



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV CHEMIE**

INSTITUTE OF CHEMISTRY

**VLIV POUŽITÉHO KAMENIVA NA VLASTNOSTI  
VÁPENNÝCH MALT**

THE EFFECT OF AGGREGATE TYPE ON THE PROPERTIES OF LIME MORTAR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Žižlavský**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Mgr. MARTIN VYŠVAŘIL, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav chemie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Tomáš Žižlavský
Název	Vliv použitého kameniva na vlastnosti vápenných malt
Vedoucí práce	Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

---

doc. Ing. Jitka Malá, PhD.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Stoklasa, Z. Zpráva č.1/2012. Využití drobného kameniva 0/2 z kamenolomu Štramberk do stavebních malt, Horní Lhota: STOZ-Zkušební laboratoř, 2012.

Lanas, J., Alvarez, J. I. Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, p. 1867–1876.

Stefanidou, M., Papayianni, I. The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. Cement & Concrete Composites, 2005, 27, p. 914–919.

Pavía, S., Toomey, B. Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly-hydraulic lime mortars. Materials and Structures, 2008, 41, p. 559–569.

Pozo-Antonio, J.S. Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. Construction and Building Materials, 2015, 77, p. 472–478.

Lanas, J., Sirera, R., Alvarez, J.I. Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions. Cement and Concrete Research. 2006, 36, p. 961–970.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

- Proveďte literární rešerši v oboru vápenných malt s přihlédnutím k ovlivnění výsledných vlastností volbou druhu použitého kameniva. Uveďte využití jednotlivých druhů kameniv v historii a poukažte na výhody/nevýhody použití konkrétního druhu kameniva ve vápenných maltách.
- V experimentální části porovnejte vliv křemenného a vápencového kameniva na vlastnosti vápenných malt. Nejprve charakterizujte vlastnosti vstupních surovin analytickými metodami. Vytvořte vzorky vápenných malt s použitím dvou druhů kameniva s různým poměrem pojivo:kamenivo. Obdobně vytvořte vzorky vápenných malt s přidavkem jemně mletého vápence. Proveďte analýzu fyzikálně mechanických a mikrostrukturních vlastností připravených malt v závislosti na čase (7, 14, 28, 90 a 180 dní).
- Výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů, proveďte diskuzi a zhodnocení dosažených výsledků. Diplomovou práci zpracujte v rozsahu 60 až 80 stran, teoretickou část zpracujte na cca 20 stran.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na porovnání vlivu různých druhů kameniva a jeho poměru k plnivu na výsledné vlastnosti vápenných malt. V teoretické části se práce zabývá vlivem jednotlivých vlastností kameniva, poměru pojiva k plnivu a použitím především vápencového kameniva na vlastnosti vápenných malt. Dále se teoretická část zabývá také historií použití vápence jako kameniva do malt i betonů. V praktické části jsou porovnávány fyzikálně mechanické a mikrostrukturní vlastnosti malt s křemenným a vápencovým kamenivem. Tyto malty byly připravovány s různým poměrem pojiva k plnivu a byl sledován i vliv přídavku jemně mletého vápence do směsi. Analýzou a porovnáním vlastností vápenných malt s různým typem kameniva, bylo zjištěno, že vápencové kamenivo je možné použít do vápenných malt. Tyto malty pak vykazují vlastnosti srovnatelné s konvenčními maltami s křemenným kamenivem. Částečná náhrada kameniva jemně mletým vápencem způsobuje znatelný nárůst pevností, především u malt s velkým poměrem pojiva k plnivu.

## **Klíčová slova**

Vápenec, vápenná malta, jemně mletý vápenec, poměr pojiva k plnivu, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, porozita, karbonatace.

## **Abstract**

The thesis is focused on the comparison of the role of different types of aggregates and the binder-aggregate ratio on the properties of lime mortars. The theoretical part of the thesis deals with the effect of properties of aggregate, a binder-aggregate ratio and a use of calcareous aggregate, especially limestone, on the properties of mortars. It also deals with the utilization of limestone as aggregate in a history of masonry. In the practical part of the thesis there is a comparison of physically-mechanical and microstructural properties of mortars prepared with different type of aggregate (siliceous sand and limestone aggregate), with varying binder-aggregate ratio and also with a partial substitution of the aggregate by limestone fines. It was found that the usage of limestone instead of quartz sand produces the mortar of comparable properties. The partial substitution of the aggregate with limestone fines caused noticeable growth of strength, especially in mortars with higher binder-aggregate ratio.

## **Keywords**

Limestone, lime mortar, limestone fines, binder-aggregate ratio, flexural strength, compressive strength, porosity, carbonation.

## **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Tomáš Žižlavský *Vliv použitého kameniva na vlastnosti vápenných malt*. Brno, 2017. 70 s., 15 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2017

---

Bc. Tomáš Žižlavský  
autor práce

**Poděkování:**

Za vedení práce a provedení fyzikálně mechanických zkoušek a termické analýzy děkuji Mgr. Martinu Vyšvařilovi Ph.D. Za provedení lomově mechanických zkoušek kolektivu Ústavu stavební mechaniky. A Ing. Patriku Bajerovi Ph.D. za provedení porozimetrie a zkoušky kapilární vztlácnosti.

## Obsah

1. Úvod .....	10
2. Kamenivo .....	11
2.1 Vlastnosti kameniva nezávislé na matečné hornině .....	11
2.1.1 „Původ písku“ nebo též tvar zrn kameniva .....	11
2.1.2 Granulometrická křivka a frakce kameniva .....	12
2.2 Vlastnosti kameniva závislé na matečné hornině .....	13
2.2.1 Pevnost kameniva .....	13
2.2.2 Nasákavost kameniva, jeho pórovitost .....	13
2.2.3 Mineralogické a chemické složení kameniva .....	13
2.3 Vliv množství kameniva, poměr B/Ag .....	14
2.3.1 Určování poměru B/Ag u stávajících malt a omítek .....	16
2.4 Vliv použití vápencového kameniva .....	17
2.4.1 Historie použití vápencového kameniva .....	17
2.4.2 Užití vápencového kameniva .....	17
2.4.3 Užití jemně mletého vápence .....	20
2.5 Karbonatace .....	20
2.5.1 Vliv relativní vlhkosti na průběh karbonatace .....	20
3 Experimentální část .....	22
3.1 Použité suroviny .....	22
3.1.1 Chemické složení .....	22
3.1.2 Granulometrický rozbor .....	23
3.1.3 Rentgenová difrakční analýza .....	24
3.1.4 Optická mikroskopie .....	25
3.1.5 Stanovení sypné hmotnosti .....	25
3.2 Příprava vzorků .....	26
3.3 Prováděné zkoušky .....	28
4. Výsledky a diskuze .....	29
4.1 Objemová hmotnost .....	29
4.2 Pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 1015–11 .....	32
4.3 Pevnost v tlaku dle ČSN EN 1015–11 .....	36
4.4 Porozimetrie .....	40
4.5 Karbonatace .....	43



4.5.1 Stanovení hloubky karbonatace pomocí fenolftaleinového testu .....	43
4.5.2 Sledování stupně karbonatace pomocí DTA.....	45
4.6 Stanovení nasákavosti dle ČSN EN 13755.....	49
4.6 Mrazuvzdornost dle ČSN 72 2452 .....	51
4.7 Přídržnost zatvrdlé malty k podkladu dle ČSN EN 1015–12 .....	53
4.8 Kapilární vzlínavost dle ČSN EN 1015–18.....	54
4.9 Lomově mechanické parametry .....	56
5 Závěr .....	59
6. Seznamy .....	61
6.1 Seznam použité literatury.....	61
6.2 Seznam symbolů a zkratek .....	64
6.3 Seznam obrázků .....	65
6.4 Seznam tabulek .....	68
6.5 Seznam příloh .....	69

# 1. Úvod

Vápno patří mezi nejstarší používaná pojiva, používané již od dob antiky. Za století a tisíciletí práce s vápnem si jednotlivé národy vyvinuly celou řadu místně specifických použití a postupů při přípravě ať již samotného vápna, nebo malt či omítek využívajících jej jako pojivo. V posledních dvou staletích se však s nástupem průmyslové revoluce, vývoje portlandského cementu, globalizace a snahy o unifikaci výrobků napříč světadíly na tato specifika poněkud pozapomnělo. Tato skutečnost nás mnohdy při opravách historických staveb staví před složitý úkol přiblížit se co nejvěrněji vlastnostem původního materiálu při použití současných, moderních, postupů a materiálů. Vápno je díky tomu, i přes nesporné výhody cementu v jeho vlastnostech, nepostradatelným materiálem při restaurátorských pracích.

V současnosti se při přípravě malt a omítek nejen pro opravné práce používá jako jemného kameniva téměř výhradně křemenných písků. Pro co nejbližší přiblížení se vlastnostem původních materiálů, ale také pro optimalizaci využití přírodních zdrojů a pro snazší dosažení potřebných vlastností, bychom se měli zabývat i použitím kameniva na bázi jiných hornin. Jako jeden z možných kandidátů s jeví právě vápenec, který se již dlouhá staletí těží právě pro přípravu vápna a je tedy pravděpodobné, že i dříve vznikaly frakce vápencového kameniva nevhodné pro výpal vápna používanou technologií a které se dále zpracovávaly ve výrobě stavebních hmot. Ať již jde o hrubší frakce vápence nebo o jeho nejjemnější podíly, u všech lze předpokládat jejich použití v historických omítkách. V průběhu staletí se také měnila ekonomická situace v regionech, stejně tak jako dostupnost vápna. V návaznosti na tyto změny, na postupy obvyklé na daném území, je poměr pojiva k plnivu u historických budov značně proměnnou veličinou, kterou lze z písemných záznamů z doby výstavby zjistit jen obtížně a přibližně.

Cílem diplomové práce je provést rešerši v oboru vápenných malt vzhledem k vlivu různých druhů a množství kameniva na jejich výsledné vlastnosti. Především však porovnat fyzikálně mechanické a mikrostrukturní vlastnosti vápenných malt s křemenným a vápencovým kamenivem, s různým poměrem pojiva ke kamenivu a následně posoudit i vliv přídatku jemně mletého vápence do těchto malt.

## 2. Kamenivo

Kamenivem se rozumí zrnitý materiál přírodního nebo umělého původu určený pro stavební účely. Do malt a omítek se kamenivo používá jako plnivo. Jeho použitím docílíme lepších vlastností, než kdyby se malta skládala pouze z pojiva, především výrazně ovlivňuje smrštění výsledné malty a v neposlední řadě má vliv i na cenu výsledné malty.

V současnosti se v maltách a omítkách používá především kamenivo křemenné, ať již těžené z vody, kopané či drcené. V minulosti ovšem byly ve větší míře využívány místní zdroje, díky čemuž jsou v historických maltách a omítkách nacházeny rozmanité druhy kameniva. Pro použití při restaurátorských a opravných pracích je výhodné používat i kamenivo podobných vlastností jako kamenivo použité v dřívějších dobách, aby bylo dosaženo co nejpodobnějších vlastností výsledné malty.

Použitím různých druhů kameniv můžeme v maltách se stejným pojivem dosáhnout velmi rozdílných výsledků. Proto by při navrhování malt a maltových směsí měl být kladen minimálně stejně velký, ne-li i větší, důraz jak na správnou volbu kameniva, tak i pojiva. Kameniva pro malty představují v převážné většině frakce 0–4 mm, které jsou též označovány jako písky.

Vliv kameniva na vlastnosti malty je sledován již od antiky a je dán souborem vlastností kameniva, který lze rozdělit na vlastnosti závislé na hornině a ty, na ní nezávislé.

### 2.1 Vlastnosti kameniva nezávislé na matečné hornině

Tyto vlastnosti lze poměrně snadno ovlivnit a je tedy možné dosáhnout v tomto směru shodných parametrů u kameniv s rozdílnou mineralogií.

#### 2.1.1 „Původ písku“ nebo též tvar zrn kameniva

Již v antice byla věnována značná pozornost původu písku a jeho čistotě z hlediska jílových minerálů. Vitruvius rozlišoval písky z pískoven hodící se pro malty pro rychlé vysychání malt a ze stejného důvodu nevhodné pro omítky, pro které se naopak hodil písek říční. Posledním pískem byl písek z mořských břehů, při jehož použití v maltě se stěny nesnadno omítaly a omítka byla narušena výkvěty. V závislosti na původu písku měnil i poměr pojiva ke kamenivu (B/Ag) a to objemově 1 : 3 pro písek z pískovny a 1 : 2 pro písky říční či mořské. Při použití písků mokrého původu doporučoval přidat třetinu dílu drcených cihel a keramických střeptů pro zlepšení vlastností malty, tedy přidání pucolánové příměsi [1].

V současnosti se častěji používá dělení dle tvaru zrn kameniva, a to na kameniva ostrohranná (především drcená) a kameniva s kulatými, oblými zrny získávaná převážně těžbou. Malty z kameniv ostrohranných vykazují vyšší

pevnostní charakteristiky než malty z kameniva oblého. Ostrá zrna se do sebe snáze zaklesnou a tvoří pevnější kostru v maltě. Avšak pro dosažení stejné zpracovatelnosti je potřeba mírně zvýšit vodní součinitel [1,2,3].

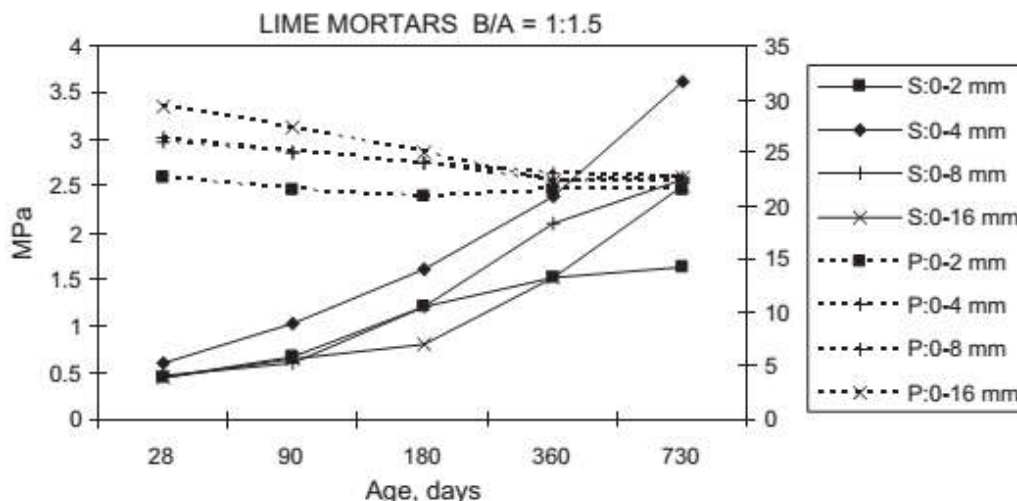
Ostrozrná kameniva však nejsou vhodná pro omítky právě kvůli tvaru zrn, který velmi znesnadňuje vyhlazení omítky, a tím i netvoří hladký povrch.

### 2.1.2 Granulometrická křivka a frakce kameniva

Volbou vhodné křivky kameniva je zajištěn správný poměr všech velikostí částic, díky kterému se dosáhne co možná nejlepšího vyplnění matrice malty kamenivem, čímž se sníží pórovitost malty, která nepříznivě ovlivňuje pevnosti.

Při použití kameniva s nadměrným zastoupením hrubších částic je omezena zpracovatelnost malty a je nutné přidat větší množství záměsové vody, čímž se zvýší pórovitost výsledné malty a sníží pevnosti. Avšak i nadměrné množství jemného podílu v kamenivu vede ke snížení zpracovatelnosti malty v důsledku velkého nárůstu měrného povrchu kameniva. Tento má za následek i snížení pevností v důsledku nedostatku pojiva a velké smrštění vede ke vzniku trhlin [2].

Výzkumem vlivu frakce kameniva na vlastnosti vápenné malty se zabýval M. Stefanidou, který porovnával vzorky se stejným poměrem B/Ag a různou frakcí kameniva.



Obr. 1 Vliv frakce kameniva na pevnost (S) a porozitu (P) malty s B/Ag 1 : 1,5 [4]

Z výše uvedeného grafu je patrné, že nejlepšími parametry je dosaženo při použití frakce 0–4 mm, která po celou sledovanou dobu dosahovala nejvyšších pevností. Porozita, která u nejjemnější frakce zůstává téměř konstantní, klesá u hrubších frakcí vlivem vyplnění pórů produkty karbonatace, čímž dochází i ke zpevnění malty [4].

## **2.2 Vlastnosti kameniva závislé na matečné hornině**

Vliv matečné horniny na výsledné vlastnosti malt a omítek si uvědomovali již v antice, a je tedy poměrně velké povědomí o vhodných a nevhodných horninách, ze kterých lze získat kamenivo pro malty.

### **2.2.1 Pevnost kameniva**

I když pro vápenné malty není pevnost kameniva až tak podstatná vzhledem k nízkým pevnostem pojiva, je potřeba brát v potaz i tuto charakteristiku. Je zřejmé, že při použití kameniva s vyššími pevnostními charakteristikami je možné dosáhnout vyšších pevností i u výsledné malty.

### **2.2.2 Nasákavost kameniva, jeho pórovitost**

U kameniv s vyšší nasákavostí je pro dosažení vhodné zpracovatelnosti nutné zvýšit vodní součinitel, čímž se do malty dostane více vody, která se následně při vysychání uvolňuje do okolního prostředí a zanechává za sebou trhlinky a otevřené kapiláry, které nepříznivě ovlivňují výsledné vlastnosti malty. Vázání vody v kamenivu lze ovšem využít v betonech a maltách s hydraulickým pojivem, kdy je tato voda spotřebována při hydrataci, a dojde tak k takzvanému samoošetřování betonu, které naopak působí pozitivně.

Nasákavost je způsobena do značné míry otevřenou pórovitostí kameniva. Kameniva pórovitá mají vyšší nasákavost, vzhledem k množství pórů nižší pevnosti a vyšší měrný povrch. Toto se mimo již výše zmíněného vázání vody projevuje taky zvýšenou spotřebou pojiva pro zachování stejných vlastností malty jako s kamenivem nepórovitým.

Pórovitá, především umělá kameniva, např. keramzit nebo experlit, jsou využívána především pro vylehčování omítek, zvyšování jejich tepelně technických vlastností a pro výrobu sanačních omítek, u kterých je naopak vysoká pórovitost žádána, neboť umožňuje uvolňování nahromaděné vody z konstrukce jejím odpařováním nejen na povrchu omítky, ale i ve vnitřních vrstvách, a tím zabraňuje i tvorbě výkvětů.

### **2.2.3 Mineralogické a chemické složení kameniva**

Mineralogické a chemické složení kameniva má také velký vliv na výsledné vlastnosti malt nebo omítek. V zásadě lze rozdělit složky kameniva na látky příznivě a nepříznivě ovlivňující vlastnosti malt a omítek.

#### **2.2.3.1 Látky ovlivňující vlastnosti malt nepříznivě**

Mezi tyto látky patří jílové částice, které obalují větší zrna kameniva a znemožňují spojení pojiva s kamenivem, a tím způsobují velký pokles pevností a soudržnost malty. Jílové částice také nepříznivě ovlivňují nasákavost výsledné malty i její odolnost. Některé jílové minerály uvolňují hlinitanové anionty, které výrazně snižují odolnost malty proti síranům a podporují vznik ettringitu, který

krystalizačními tlaky při svém vzniku roztrhá strukturu omítky, a tím ji znehodnotí. Nepříznivý vliv jílu byl znám již od antiky, kdy se obsah jílových minerálů v kamenivu označoval jako hlinitost a Vitruvius píše: „Vhodný je také takový písek, který naházen na bílý šat a potom zase střepán nebo sklepán, šat nezašpiní, přičemž se na šatu neusadí žádná hlína.“ V současnosti se kopané písky obsahující jílové minerály propírají vodou, která tyto drobné části odplaví [1, 5, 6].

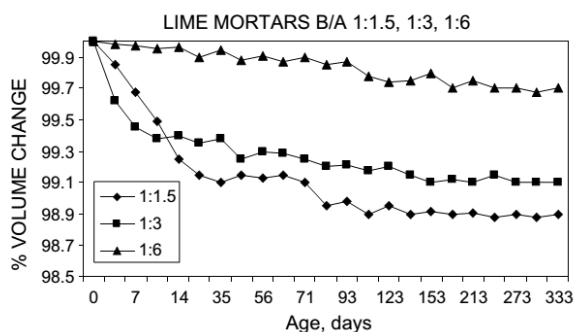
Po chemické stránce jsou v kamenivu do malt nevhodné soli, a to především sulfidy, sírany a chloridy, které nepříznivě ovlivňují karbonataci i hydraulické reakce v pojivu. Soli jsou v maltách a omítkách nevhodné i po estetické stránce, kdy se časem vyluhují z konstrukce na povrch, kde po odpaření vody tvoří výkvěty. Už Vitruvius se zmiňuje o tom, že při použití mořského písku pro zdící maltu je po nahození takové zdi omítkou tato rozrušována vylučováním solí [1,5].

### 2.2.3.2 Látky ovlivňující vlastnosti malt pozitivně

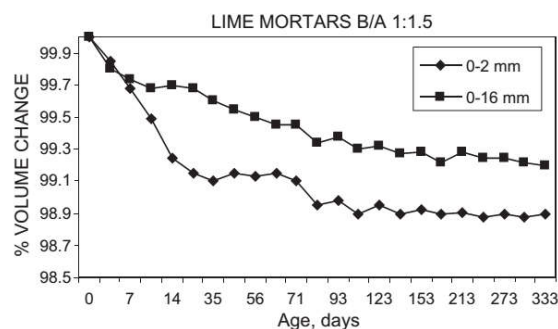
Příznivě na výsledné vlastnosti malty působí především hydraulické oxidy (v největší míře amorfni  $\text{SiO}_2$ ), které spolu s oxidy a hydroxidy vápenatými obsaženými v pojivu a vodou tvoří C-S-H fáze hydraulickými reakcemi obdobně jako při použití portlandského cementu. Tohoto si byli vědomi už Římané, kteří pro vylepšování svých vápenných malt hojně využívali vulkanické písky z okolí městečka Puzzoli, ale též drcené cihly a střepy keramických nádob. Dále je také možné využít kameniva vápencového, které pravděpodobně tvoří krystalizační jádra, díky kterým urychluje karbonataci, a kterému se podrobněji věnuje kapitola 2.4 [1,5,7].

## 2.3 Vliv množství kameniva, poměr B/Ag

Velmi podstatný dopad na výsledné vlastnosti malty má i poměr kameniva k pojivu, který ovlivňuje všechny její vlastnosti. Množství kameniva má vliv na zpracovatelnost malty, takže při rostoucím poměru B/Ag roste i vodní součinitel, který poté zvyšuje porozitu pojivové části malty. Množství kameniva v maltě a jeho granulometrie mají významný vliv na smršťování malty v průběhu vysychání a vytvrzování, kdy při vyšším zastoupení kameniva vykazuje malta nižší smrštění, stejně tak jako u kameniva s větší frakcí [2,4].



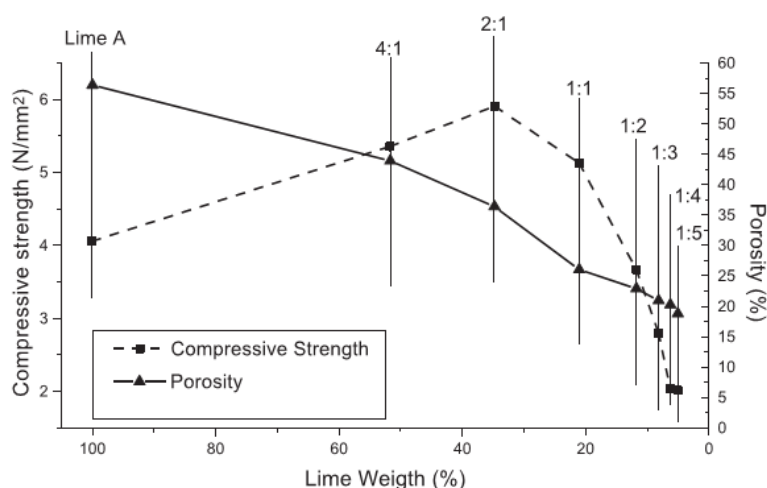
Obr. 2 Vliv poměru B/Ag na smrštění vápenné malty [4]



Obr. 3 Vliv frakce kameniva na smrštění vápenné malty [4]

Poměrem B/Ag se zabývalo již několik autorů, kdy jejich výsledky se při určení ideálního poměru rozcházejí a každý z nich k této problematice přistupuje cíleně pro svůj konkrétní případ a z většiny nelze vyvozovat všeobecné závěry. Je obecně přijímáno, že jako ideální a především nejpoužívanější je poměr 1 : 3 objemově. Avšak především při restaurátorských pracích je snaha se co nejpřesněji přiblížit původní maltě ve všech směrech.

Cazzala a kol. [8] ve své práci porovnávali pouze poměry 1 : 3 a 1 : 4 a to u malt připravovaných z různě starých vápenných kaší a z komerčního vápenného hydrátu. Pro vápenné kaše doporučují objemový poměr blízký se 1 : 4, z důvodu snížení ceny výsledné malty stejně jako jejího nižšího smrštění při zachování dostatečných pevností při velké rychlosti karbonatace. Avšak pro malty z vápenného hydrátu doporučují objemový poměr 1 : 3 pro dosažení obdobných vlastností jako malty z vápenné kaše. Maropoulou a kol. [9] Doporučuje pro obnovu zemětřesením porušeného chrámu Hagia Sophia použít poměr 1 : 3, který se nejčastěji vyskytuje u staveb z období byzantské říše, a naznačuje, že ne ve všech obdobích je využíváno stejného poměru a že za dob Osmanské říše byl nejužívanější poměr 1 : 2. J. Lanas a J. I. Alvares [7] se této problematice chopili důkladněji a připravili vzorky pro objemové poměry 1 : 1 až 1 : 5 při použití různých druhů kameniva. Ve všech případech nejvyšších pevností dosahovaly poměry 1 : 1. Za povšimnutí rovněž stojí zjištění, že rozdíly mezi poměry 1 : 3, 1 : 4 a 1 : 5 jsou malé v porovnání s rozdíly mezi 1 : 1 a 1 : 2, případně mezi jimi samotnými. Připravili také vzorky s poměry 2 : 1 a 4 : 1 a zjistili, že pevnosti s rostoucím množstvím pojiva rostou pouze do určitého okamžiku, který leží přibližně u poměru 2 : 1 (1 : 0,5).



Obr. 4 Vliv poměru B/Ag na pevnost v tlaku a porozitu vápenné malty [7]

Z výše vyobrazeného grafu je patrné, že porozita naopak neustále roste až k vzorkům bez přidaného plniva. Ve své práci se bohužel nezaměřili na smrštění malty, které by zřejmě pomohlo při určování vhodného poměru. J. S. Pozo–Antonio [10] porovnával malty s vápencovým kamenivem vzhledem k ošetřovacím

podmínkách a sledoval jejich pevnosti a smrštění. Pro vápno použil poměry 1 : 2,5 a 1 : 4 a zjistil, že při 90% relativní vlhkosti dosáhla lepších vlastností malty s poměrem 1 : 2,5, zatímco při vlhkosti okolního prostředí 70 % lépe dopadla malta s poměrem 1 : 4. M. Stefanidou a I. Papyani [4] porovnávali malty s kamenivem o různých frakcích, jak je již zmíněno v kapitole 2.1.2, tak i různé poměry B/Ag. Při sledování pevností došli k obdobným závěrům jako J. Lanas a J. I. Alvares [9] s překvapivě dobrým výsledkem pevností u poměru 1 : 2,5, který u jejich vzorků předčil i poměr 1 : 1. Oproti španělským autorům sledovali i objemové změny vzorků malty, u kterých je zřejmé, že mezi poměry 1 : 3 a 1 : 1 není při kamenivu, které použili, podstatný rozdíl ve smrštění.

Byť výše zmínění autoři zpracovávali danou problematiku z rozdílných pohledů, je při porovnání jejich výsledků zjevné, že obecně zažitý objemový poměr 1 : 3 je vhodně zvoleným kompromisem mezi požadavky na pevnost malty, její smrštění a porozitu, a tedy i odolnost vnějším vlivům.

### **2.3.1 Určování poměru B/Ag u stávajících malt a omítek**

Při obnově památek a historických staveb je pro restaurátory důležité se co nejvíce přiblížit vlastnostem stávajícím materiálům použitým v konstrukci z důvodu kompatibility se zbytkem stavby, ale také kvůli dosažení co nejvyšší trvanlivosti provedené práce. Existuje několik metod, kterými lze určit množství kameniva ve vzorku, avšak vždy jsou výsledky zatíženy značnou chybou. Porovnáním výsledků z nejběžnějších metod, avšak na vzorcích připravených pro toto porovnání, a tedy poměrně čerstvých, se zabýval F. Cassadio a kol. [11].

Metody využívající mechanického nebo chemického oddělení kameniva od pojiva pracují s předpokladem 100% karbonatace z důvodu přepočtu pojiva, které je obsaženo ve zkoumaném vzorku (povětšinou  $\text{CaCO}_3$ ), a pojiva, které bylo použito při přípravě malty (z velké části  $\text{Ca(OH)}_2$ ). Již tímto předpokladem je vnášena do stanovení jistá chyba.

Oddělování pojiva chemickou cestou, tedy jeho rozpouštění v kyselinách je velmi rychlou a nenáročnou metodou, která je ovšem vhodná pouze pro kameniva křemenná, protože nejhojněji používaná kyselina chlorovodíková (HCl) je i v nízkých koncentracích a při krátkém působení příliš agresivní a rozpouští i vápencové kamenivo, čímž ve výsledku vzorek vykazuje vyšší zastoupení pojiva. Tohoto se lze částečně vyvarovat použitím EDTA (kyselina ethylendiamin-tetraoctová), která se při koncentraci 0,05 M nejvíce z chemických metod výsledky blížila skutečně použitému poměru.

Při oddělování pojiva mechanicky se ukázalo být velmi výhodné po prvotním mechanickém očištění kameniva použít ještě ultrazvukovou čističku, čímž se výsledky velmi zpřesnily.

Dále pak bylo využito metody digitální analýzy obrazu, kdy se na vyleštěných a ošetřených nábrusech vzorků počítala plocha kameniva i pojiva.



Tyto metody už pracovaly s chybou do 5 % a byla prokázána možnost jejich použití i na malty historické. Nevýhodou této metody je problém s odlišením jemných frakcí kameniva v pojivu, i přes tyto nedostatky je však metoda nejpřesnější.

Autoři ovšem přiznávají, že vše je též velmi závislé na požitém kamenivu a dokládají to i výsledky jejich práce, kdy při porovnání malt s dvěma různými druhy kameniva metoda vhodná pro jedno kamenivo se ukázala stěží použitelnou pro kamenivo druhé. Velkou roli v nepřesnostech hrají především otevřené póry kameniva, ve kterých zůstává ukryta část pojiva.

## **2.4 Vliv použití vápencového kameniva**

### **2.4.1 Historie použití vápencového kameniva**

Cílené použití uhličitánového kameniva se datuje minimálně do období starověku, kdy ho ve svém díle zmiňuje Marcus Vitruvius Polio, a to především využívání mramorové drti do omítek jak Řeckých tak i Římských, které jeho použitím a důkladným zpracováním dosahovaly významných mechanických i estetických vlastností.

V průběhu staletí, po pádu Římské říše, kdy došlo k částečnému úpadku civilizace, a tím i poklesu nároků na estetiku a trvanlivost běžných staveb, byly mnohé postupy zapomenuty, zavrhnuty pro přílišnou pracnost a pouze některé zůstaly uchovány v pramenech. V tomto období tedy užití vápenců do malt a omítek je spíše nahodilé a závislé na místních poměrech.

Až v období renesance, kdy se společnost začala pomalu přibližovat společnosti antického Říma, byly oprášené staré postupy a s požadavky na výzdobu budov horních vrstev obyvatelstva a církve se rozšířilo tzv. Stucco lustro, což je freska malovaná do čerstvé omítky, která je co do složení a provedení shodná s omítkou Římskou dle Vitruvia, a následně vyleštěná achátem, leštěcí špachtlí či štukátorskou žehličkou. Také se začalo rozšiřovat takzvané kletování ve vápně, tedy broušená navlhčená omítka hlazená směsí vápenné kaše a jemné mramorové moučky, které se používalo jako podkladu pod malby. Rozšířil se také marocký štuk, známý též jako tadelakt, kde byly místo křemenných plniv použity jíly.

V současnosti se používají všechny výše zmíněné postupy a také se drcený vápenec přidává do suchých omítkových a maltových směsí [1, 5, 12, 13].

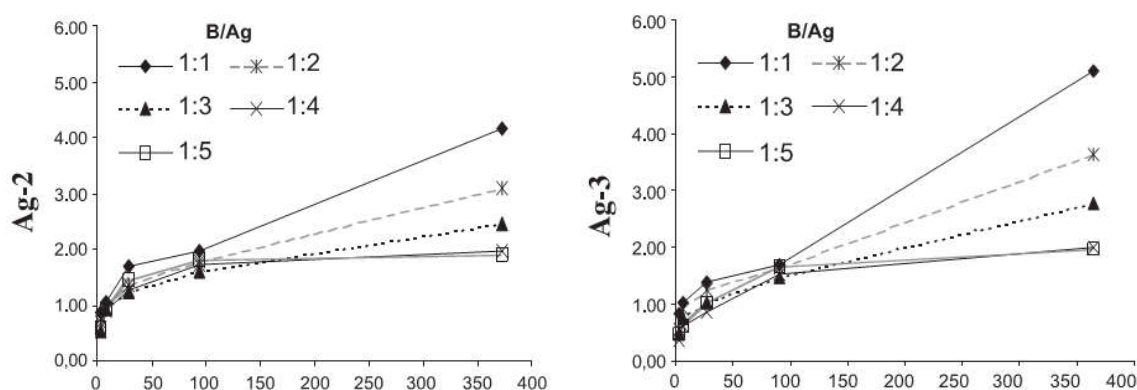
### **2.4.2 Užití vápencového kameniva**

Vápencového kameniva se používá především v místech, kde není dostatek zdrojů jiného kameniva a je tedy velmi nákladná jeho doprava na velkou vzdálenost. Kameniva z velmi tvrdých vápenců se využívá hojně ve Francii na Azurovém pobřeží v okolí Nice a Marseille, ve francouzském středohoří v okolí

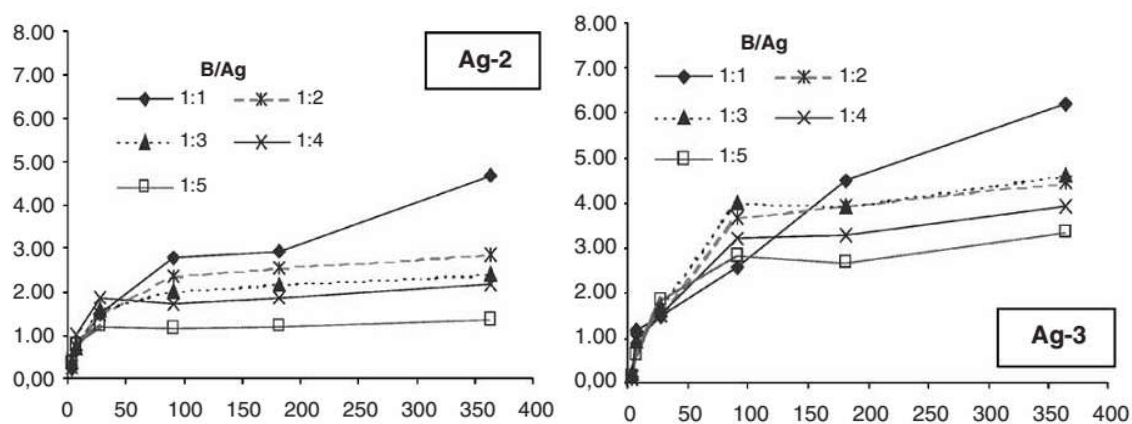
Albi i v okolí Sieny, kde se ovšem používá v kombinaci s říčním pískem. Kameniva z velmi tvrdých vápenců je použito pro runway pařížského letiště i pro segmenty francouzské části chanell tunelu pod kanálem La Manche, kde byla část nahrazena kamenivem kopaným, kvůli lepší úpravě povrchu [18].

Používáním vápenců jako kameniva do omítek se zabývají především J. Lanas a J. I. Alvares, kteří se ve svých pracích zabývají rozdíly mezi maltami s rozdílným typem kameniva a poměrem B/Ag, a to jak u vápna vzdušného tak dolomitického a přirozeného hydraulického. Ve všech případech dosahovaly malty s vápencovým kamenivem vyšších pevností než v případě křemenného kameniva s nízkým podílem amorfních fází, jak je patrné z obr. 5–8.

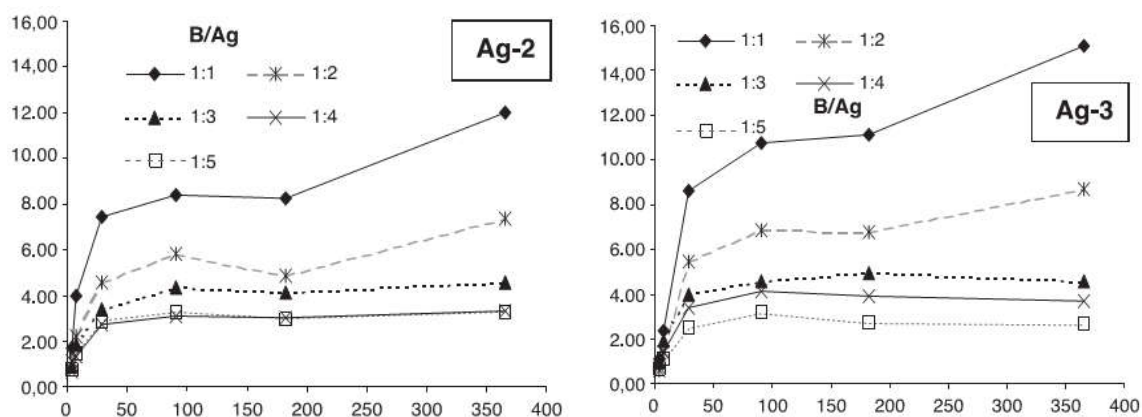
V případě dolomitického vápna a vápna hydraulického připisují nárůst pevností syntaxiálnímu růstu krystalů při karbonataci, čímž došlo ke zlepšení vlastností kontaktní vrstvy, stejně jako i k snížení počtu pórů o velkém poloměru. Naopak u vápna vzdušného připisují nárůst pevností většímu počtu pórů o větším poloměru, díky kterým dojde rychleji ke karbonataci a jsou omezena napětí při vysychání malty [7, 14, 15].



Obr. 5 Pevnosti v tlaku na vzorcích vzdušného vápna, ag-2 křemenné kamenivo ag-3 kamenivo vápencové [7]



Obr. 6 Pevnosti v tlaku na vzorcích dolomitického vápna, ag-2 křemenné kamenivo ag-3 kamenivo vápencové [14]



Obr. 7 Pevnosti v tlaku na vzorcích hydraulického vápna, ag-2 křemenné kamenivo ag-3 kamenivo vápencové [15]

K obdobným výsledkům dospěl i J. S. Pozzo–Antonio, který sledoval především vliv ošetřování vzorků na konečné výsledky zkoušek po 28 dnech pro malty z vápna vzdušného, přirozeného hydraulického, vápenocementové malty i cementové malty. Konstatoval, že ve všech případech byly pevnosti vyšší u vápencového kameniva, než u kameniva křemenného, stejně jak tvrdí J. Lanás a J. I. Alvares [10].

K opačným výsledkům dospěli S. Pavía a B. Toomey, kteří porovnávali čtyři kameniva z hlediska různých vlastností a jejich vliv na vlastnosti výsledné malty. Vápencové kamenivo vycházelo jako jedno z nejhorších z pohledu pevnostních vlastností, i když například v případě porozity nijak nevybočovalo a v případě kapilární nasákavosti patřilo k nejlepším. Autoři zde přiznávají, že v případně vlivu uhličitánového kameniva mají jistě vliv i vlastnosti horniny, z které pochází, a tedy nelze vyloučit, že uhličitánové kamenivo vychází hůře především proto, že bylo použito křídý, která je z hlediska pevnostních charakteristik mezi horninami na bázi  $\text{CaCO}_3$  nejhorší [2].

Z. Stoklasa zpracoval pro vápencový lom Štramberk studii pro využití drobného drceného kameniva frakce 0–2 mm do malt pro zdění a omítek, a to vápenných, vápenocementových, cementových a připravených s pomocí Unimaltu 14 – suché maltové struskocementové směsi s příměsí vápence. Použit byl poměr B/Ag 1 : 3 objemově a v případě Unimaltu i 1 : 4 objemově. Kamenivo z lomu Štramberk dotřízené na frakci 0–2 mm shledal použitelným pro přípravu malt a omítek při tomto poměru.[16]

Jsou také pokusy s použitím vápence jako částečné náhrady metakaolinu v alkalicky aktivovaných materiálech. Bylo zjištěno, že při použití sodného vodního skla je tato náhrada neúčinná a materiál ztrácí pevnosti, zatímco při použití vodního skla draselného jsou při nahrazení více než 32 % metakaolinu vápencovým pískem pevnosti srovnatelné s materiálem bez vápence. Je zde tedy

možnost využití této náhrady zejména s ohledem na rozdíl v cenách metakaolinu a vápencového písku [23].

### 2.4.3 Užití jemně mletého vápence

Vápencové, či spíše mramorové moučky se v historii využívaly především ve štukatérství a při výrobě speciálních omítek sloužících jako podklad pod fresky.

V současné době se využívá jemně mletého vápence v mnoha průmyslových odvětvích, ať již v zemědělství při tzv. vápnění půdy, přes vápennou vypírku při odsiřování velkých kotlů na tuhá paliva, především tepelných elektráren, pigmentů pro výrobu papíru až po stavebnictví.

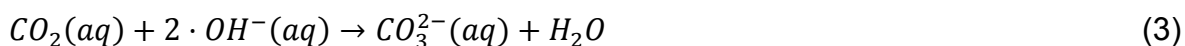
Ve výrobě stavebních hmot se jemně mletý vápenec používá jako příměs do suchých omítkových a maltových směsí, kde může mimo jiné sloužit i ke korekci granulometrické křivky. Používá se také jako příměs do směsného cementu B/LL a především jako tzv. filleru v samozhutnitelných betonech. Náhrada až 10 % cementu mletým vápencem mírně zvyšuje pevnosti cementové pasty [17].

Bylo prokázáno, že náhrada části křemenného kameniva jemně mletým vápencem ve vápenných omítkách zvyšuje pevnostní charakteristiky omítky a působí příznivě na součinitel vlhkostní vodivosti, který je ovlivněn porozitou a rozložením pórů v maltě. Bylo také zjištěno, že nejvhodnější je použití jemně mletého vápence se střední velikostí částic 2–5  $\mu\text{m}$  [18].

## 2.5 Karbonatace

Malty a omítky ze vzdušného vápna nejdříve vytvrdnou pouhým vyschnutím a následně v nich probíhá karbonatace, díky které pomalu získávají finální vlastnosti.

Karbonatace je velmi pomalá reakce probíhající postupně podle rovnic:



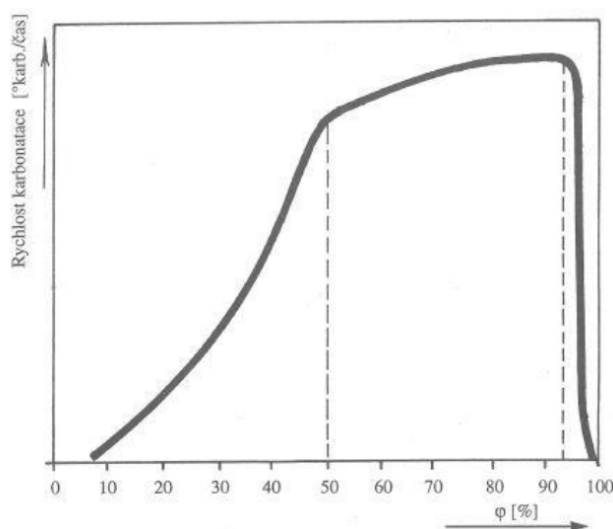
Z těchto rovnic je zřejmé, že většina procesů probíhá ve vodném prostředí, a proto je přítomnost vody pro průběh karbonatace klíčová.

### 2.5.1 Vliv relativní vlhkosti na průběh karbonatace

Vzhledem k výše uvedeným rovnicím je zřejmé, že pro průběh karbonatace je potřebná přítomnost vody v maltě. Z obr. 8 je vidět, že přibližně při 92 %

relativní vlhkosti rychlost karbonatace prudce klesá, protože binární koeficient difuze  $\text{CO}_2$  ve vodě je přibližně  $10^5$  krát nižší než ve vzduchu. Naopak při nízkých relativních vlhkostech (udává se 8 % jako minimum pro průběh karbonatace) je sice rychlost difuze  $\text{CO}_2$  dostatečná, avšak ve vodě není rozpuštěn dostatek  $\text{Ca(OH)}_2$ . [19, 20, 21].

Z tohoto a níže uvedeného obrázku je zřejmé, že při uložení při vyšší relativní vlhkosti docílíme rychlejšího průběhu karbonatace, a tím i vyšších pevností. Toto dokázal i J. Lanas a kol., kdy vzorky vápenných malt uložené ve venkovním prostředí vykazovaly lepší pevnosti než vzorky uložené v laboratoři [22].



Obr. 8 Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu [19]

### 3 Experimentální část

Cílem experimentální části je ověřit pozitivní vliv vápencového kameniva na vlastnosti vápenných malt při různých poměrech B/Ag a také ověřit pozitivní vliv přídavku jemně mletého vápence do těchto malt a provést analýzu těchto vlastností v závislosti na čase (7, 14, 28, 90, 180 a 365 dní). Porovnáním vlastností vápenných malt při použití křemenného a vápencového kameniva je možné zhodnotit použitelnost jemné frakce vápencového kameniva z lomu Štramberk do vápenných omítek.

#### 3.1 Použité suroviny

Pro výrobu zkušebních vzorků byl použit vápenný hydrát CL 90 S společnosti CARMEUSE CZECH REPUBLIC s.r.o. závod Mokrý obchodním názvem Supercalco odpovídající ČSN EN 459–1. Jako křemenné kamenivo byla použita směs frakcí čistých křemenných písků PG I, PG II a PG III od společnosti Filtrační písky s.r.o. Vápencové kamenivo bylo použito drcené z vápencového lomu Štramberk patřícího společnosti CEMEX Sand k. s. Jemně mletý vápenec s označením 2 VA dodala firma OMYA CZ s.r.o. sídlící ve Vápenné.

Byla provedena chemická analýza kameniv (tab. 1 a 2), jejich granulometrický rozbor (obr. 9), analýza mineralogického složení pomocí rentgenové difrakční analýzy (tab. 3, obr. 10) a jejich porovnání na snímcích z optického mikroskopu (obr. 11 a 12).

##### 3.1.1 Chemické složení

Tab. 1 Chemické složení kameniv [hm. %]

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO
vápenný hydrát	68,09	1,34	1,21	0,39	0,02	0,38
křemenný písek	0,00	98,50	1,58	0,15	0,02	0,03
vápenec Štramberk	51,03	1,76	0,95	0,22	0,05	0,45
2 VA	54,73	0,81	0,32	0,10	0,01	0,39

Tab. 2 Chemické složení kameniv [hm. %], pokračování

	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Z. Ž.
vápenný hydrát	0,00	0,02	0,03	0,14	0,08	0,05	27,88
křemenný písek	0,00	0,09	0,01	0,09	0,06	0,04	0,12
vápenec Štramberk	0,05	0,76	0,15	0,08	0,03	0,27	42,77
2 VA	0,01	0,03	0,01	0,08	0,00	0,02	43,99

Složení vápenného hydrátu odpovídá dostupným údajům od výrobce.

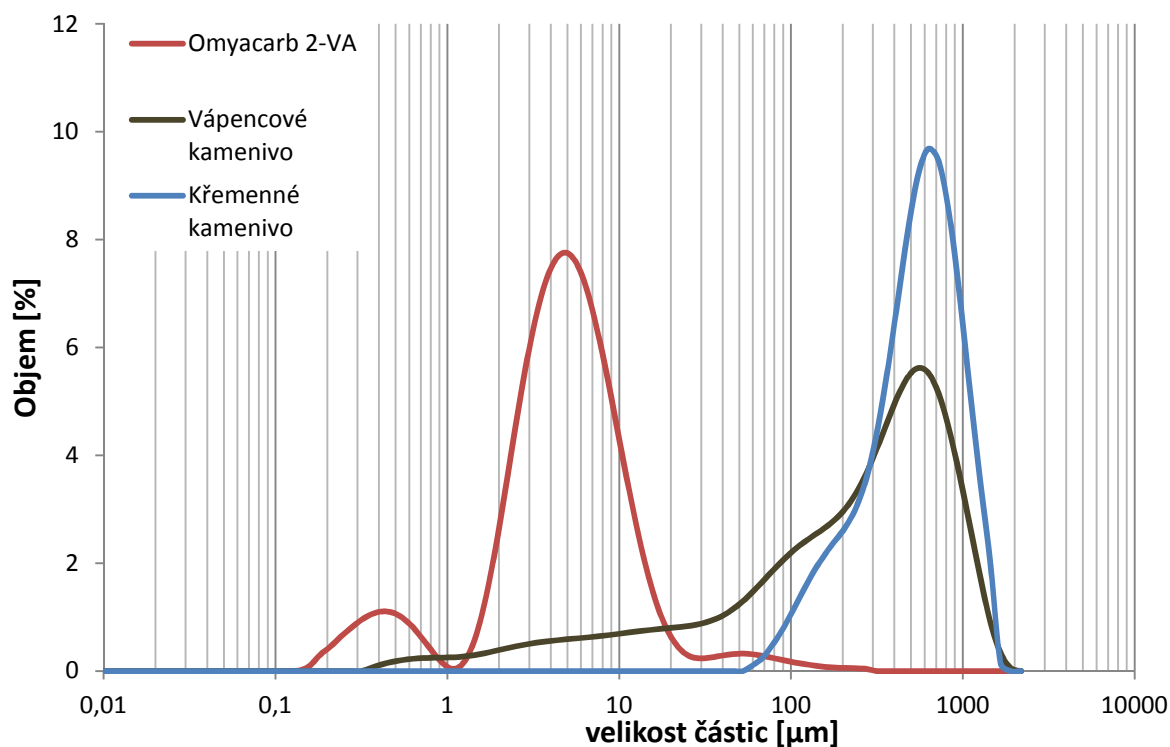
Chemické složení křemenného písku ukazuje na jeho vysokou čistotu a především na naprostou nepřítomnost vápníku v jakékoliv formě v něm, a je tedy vhodný pro porovnání s kamenivem vápencovým.

Z chemické analýzy vápence z lomu Štramberk je vidět jeho vysoká čistota. Vápenec obsahuje velmi málo hořčíku, malá množství hliníku a draslíku, které pravděpodobně spolu s křemíkem ukazují na malý podíl jílových minerálů a další prvky již ve velmi malých koncentracích.

Jemně mletý vápenec 2 VA je velmi čistý (98 %  $\text{CaCO}_3$ ) a mimo malé množství hořčíku, hliníku a křemíku obsahuje ostatní prvky pouze ve stopových koncentracích.

### 3.1.2 Granulometrický rozbor

Smísením frakcí PG I, PG II a PG III by mělo vzniknout kamenivo frakce 0–2,5 mm. Proto byl vápenec ze Štramberka, který zde třídí pouze do frakce 0–4 mm přeseť přes síto o velikosti ok 2,5 mm, aby byla zachována shodná velikost maximálního zrna kameniva. Jemně mletý vápenec 2 VA by měl mít dle výrobce střední velikost částic 2  $\mu\text{m}$ .



Obr. 9 Granulometrie kameniv

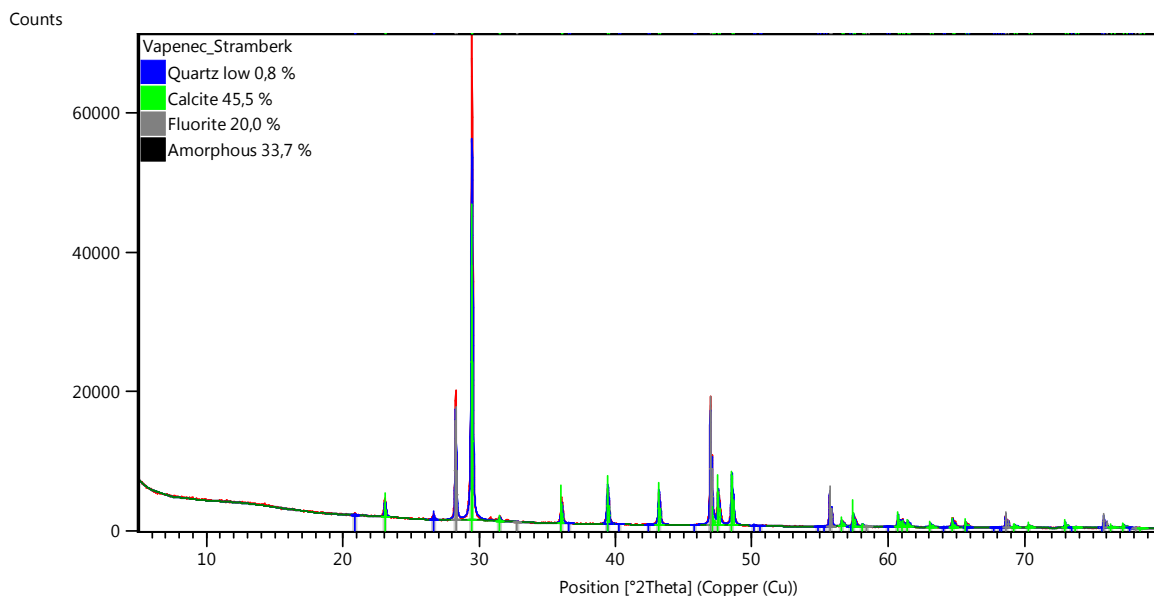
Z granulometrické křivky křemenného kameniva lze vyčíst, že jde v porovnání se Štramberským vápencem o kamenivo poměrně úzké frakce, které již v oblasti pod 50  $\mu\text{m}$  neobsahuje žádné částice. Lze předpokládat, že vzorky vyrobené čistě z kameniva křemenného budou vykazovat mírně horších vlastností v porovnání se vzorky z kameniva vápencového již z důvodu absence velmi jemných zrn. Lze předpokládat, že toto bude při přidavku jemně mletého vápence kompenzováno jeho přidavkem, kterým naopak můžeme u vzorků z vápencového kameniva dosáhnout až přílišného obsahu jemných částí.

### 3.1.3 Rentgenová difrakční analýza

Rentgenogramy byly pořízeny pomocí XRD Empyrean firmy PANalytical, což je multifunkční zařízení využívající XRD včetně Rietveldovského rozhraní, vysokoteplotní komůrky a SAXS společně s ovládacím software Data Collector. Byla provedená kvantitativní fázová analýza kalibrací metodou vnitřního standardu. Jako vnitřní standard byl zvolen fluorid vápenatý. Ke každému analyzovanému vzorku byl přidán hmotnostní podíl  $W_o = 20\%$   $\text{CaF}_2$ .

Tab. 3 Chemické složení kameniv [%]

	kalcit	křemen	amorfní fáze
křemenný písek	–	100	–
vápenec Štramberk	56,9	1	42,1
2 VA	97,8	–	1,2



Obr. 10 Difraktogram vápence Štramberk



### 3.1.4 Optická mikroskopie



Obr. 11 Křemenný písek



Obr. 12 vápenec Štramberk

Ze snímků z optického mikroskopu je vidět, že křemenný písek má zrna zaoblenější než vápencové kamenivo, takže bude dle [1,2,3] pravděpodobně vykazovat mírně nižší pevnosti především v tahu za ohybu, ale i v tlaku.

Zrna vápencového kameniva z lokality Štramberk jsou ostrohranější a tedy by do sebe měly lépe zaklesnout a pomoci maltě dosáhnout vyšších pevností, pro stejnou zpracovatelnost malty bude nejspíš potřeba větší množství záměsové vody. K tomuto závěru směřuje i větší měrný povrch kameniva, které není tak hladké jako křemenný písek a na snímcích z mikroskopu se jeho povrch jeví až "chlupatý".

### 3.1.5 Stanovení sypné hmotnosti

Sypná hmotnost byla stanovena dle ČSN 1097–3 [24], tedy volným nasypáním do nádoby o známém objemu. Nebyla použita nádoba o objemu 1 dm<sup>3</sup>, požadovaná v tabulce 3.1 této normy, ale nádoba o větším objemu, konkrétně 1,985 dm<sup>3</sup>. Ostatní postupy dle normy byly dodrženy.

Tab. 4 Sypné hmotnosti

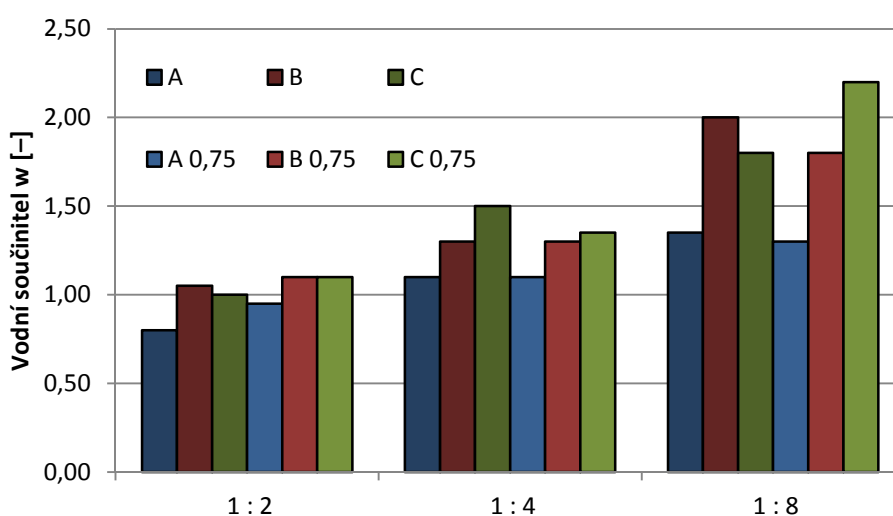
	sypná hmotnost
	[kg m <sup>-3</sup> ]
Carmeusse CL 90 S	465
2VA	755
vápenec Štramberk	1350
PG I+II+III	1670

Sypná hmotnost byla stanovena především pro následný přibližný přepočet poměru B/Ag z hmotnostního na objemový. Na základě sypných hmotností lze předpokládat, že malty připravené z kameniva vápencového budou vykazovat nižší objemovou hmotnost než malty s kameniva křemenného, na další sledované fyzikálně mechanické vlastnosti by sypná hmotnost vliv mít neměla.

### 3.2 Příprava vzorků

Bylo připraveno celkem osmnáct různých vápenných malt s poměrem B/Ag 1 : 2, 1 : 4 a 1 : 8 hmotnostně odpovídající objemovým poměrům 1 : 0,6; 1 : 1,2 a 1 : 2,4 a následně s náhradou 0,75 hmotnostního dílu kameniva jemně mletým vápencem. Jako kameniva bylo použito směsi křemičitých písků frakcí PG I, PG II a PG III v hmotnostním poměru 1 : 1 : 1 (dále ve značení směsí a vzorků kamenivo A), vápencového kameniva Štramberk (dále ve značení směsí a vzorků kamenivo C) a směsi těchto kameniv v poměru 1 : 1 (dále ve značení směsí a vzorků kamenivo B).

Vzorky byly připravovány v míchačce, kde byl nejdříve smíchán vápenný hydrát s daným množstvím vody, a do této pasty bylo za pomalého míchání vmícháno dané množství kameniva, následně byla směs míchána 5 minut pomalu a na závěr ještě 1 minutu na vyšší rychlost. Malty byly připravovány na zpracovatelnost  $160 \pm 5$  mm rozlití na střešacím stole dle ČSN EN 1015–3 [25]. Následně byla malta uložena do forem  $40 \times 40 \times 160$  mm a odformována po 72 hodinách. Po odformování byly vzorky uloženy v laboratorním prostředí ( $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $55 \pm 5\%$  rh) do provedení zkoušek. Jedna sada (3 vzorky) byla po 7 dnech od namíchání uložena ve venkovním prostředí, kde na ni po dobu 358 dnů působily klimatické vlivy.



Obr. 13 Vodní součinitele připravených malt

Tab. 5 Receptury malt

vzorek	Ca(OH) <sub>2</sub>	Písky PG	vápenec Štramberk	2 VA	voda	rozliv	w	w/s
	[g]	[g]	[g]	[g]	[ml]	[mm]	[–]	[–]
A 1–2–0	100,0	200,0	–	–	80	164	0,80	0,27
A 1–4–0	100,0	400,0	–	–	110	156	1,10	0,22
A 1–8–0	100,0	800,0	–	–	135	158	1,35	0,15
B 1–2–0	100,0	100,0	100,0	–	105	155	1,05	0,35
B 1–4–0	100,0	200,0	200,0	–	130	155	1,30	0,26
B 1–8–0	100,0	400,0	400,0	–	200	162	2,00	0,22
C 1–2–0	100,0	–	200,0	–	100	156	1,00	0,33
C 1–4–0	100,0	–	400,0	–	150	155	1,50	0,30
C 1–8–0	100,0	–	800,0	–	180	158	1,80	0,20
A 1–1,25–0,75	100,0	125,0	–	75,0	95	155	0,95	0,32
A 1–3,25–0,75	100,0	325,0	–	75,0	110	165	1,10	0,22
A 1–7,25–0,75	100,0	725,0	–	75,0	130	164	1,30	0,14
B 1–1,25–0,75	100,0	62,5	62,5	75,0	110	158	1,10	0,37
B 1–3,25–0,75	100,0	162,5	162,5	75,0	130	155	1,30	0,26
B 1–7,25–0,75	100,0	362,5	362,5	75,0	180	159	1,80	0,20
C 1–1,25–0,75	100,0	–	125,0	75,0	110	162	1,10	0,37
C 1–3,25–0,75	100,0	–	325,0	75,0	135	155	1,35	0,27
C 1–7,25–0,75	100,0	–	725,0	75,0	220	159	2,20	0,24

Z množství vody použité pro dosažení předepsané konzistence daných malt vidíme, že nejmenší vodní součinitel potřebovaly ve všech případech malty A – z křemenného kameniva. Tímto byl potvrzen předpoklad z kapitoly 3.1.4, že malty s obsahem vápencového kameniva (B a C) budou pro dosažení stejné zpracovatelnosti potřebovat větší množství záměsové vody. S rostoucím poměrem B/Ag roste hodnota vodního součinitele. Při porovnání potřeby vody na celkovou suchou omítkovou směs tato s rostoucím poměrem B/Ag naopak klesá.

S přidavkem jemně mletého vápence do malty obvykle potřebujeme přidat i větší množství záměsové vody. Je zde také vidět vliv úpravy granulometrie kameniva na reologické vlastnosti malty. S přidavkem jemných frakcí do kameniva A s vyšším poměrem B/Ag získáme při stejném vodním součiniteli maltu řidší konzistence, tedy s větším rozlivem dle ČSN 1015–3, toto je vidět v případě vzorků A 1–4–0 a A 1–3,25–0,75, kde při stejném množství záměsové vody získáme malty s hodnotami rozlivů v protilehlých krajních mezích požadovaného intervalu. Toto je ještě zřetelnější u malty s poměrem B/Ag 1 : 8, kde jsou hodnoty rozlivu stejně odlehlé jako u malt A 1 : 4, avšak pro maltu s přidavkem jemně mletého vápence je použito méně záměsové vody. Tento vliv se obdobně projevuje i u malt se smíšeným kamenivem (B), avšak pouze u většího poměru 1 : 8, u poměru 1 : 4 není pozorován žádný rozdíl v konzistenci při stejném vodním součiniteli. Kamenivo C má už samo o sobě dobrou granulometrii a přidavkem jemných částí nám její změna nepřinese zlepšení reologických vlastností čerstvé

malty, avšak vzroste měrný povrch kameniva, který je potřeba smáčet, a tím vzroste i potřeba záměsové vody.

### 3.3 Prováděné zkoušky

Na vzorcích byly po uplynutí daného časového úseku od namíchání malty prováděny zkoušky fyzikálně mechanických, mikrostrukturních i chemických vlastností.

Po 7 a 14 dnech bylo provedeno stanovení objemové hmotnosti vážením a měřením rozměrů vzorků a stanovení pevností v tahu za ohybu a tlaku dle ČSN EN 1015–11 [26].

Po 28 dnech zrání byly stanoveny objemové hmotnosti, pevnost v tahu a tlaku dle ČSN EN 1015–11, nasákavost dle ČSN EN 13755 [27], mrazuvzdornost dle ČSN 72 2452 [28], hloubka karbonatace s pomocí fenolftaleinového testu, porozita malty pomocí vysokotlaké rtuťové porozimetrie přístrojem Micromeritics PoreSizer 9310, stanovení obsahu portlanditu ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) a kalcitu ( $\text{CaCO}_3$ ) v maltě pomocí diferenčně termické analýzy (DTA) a termogravimetrie (TG), stanovení přídržnosti zatvrdlé malty k podkladu dle ČSN EN 1015–12 [29], stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě dle ČSN EN 1015–18 [30] a na vybraných vzorcích byly provedeny zkoušky lomové mechaniky a získány tak základní lomové parametry (modul pružnosti, lomová houževnatost, lomová energie).

Po 90, 180 a 365 dnech byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu a tlaku dle ČSN EN 1015–11, hloubka karbonatace pomocí fenolftaleinového testu a obsah  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $\text{CaCO}_3$  pomocí DTA. Po 365 dnech byly tyto vlastnosti stanoveny i na vzorcích uložených v exteriéru.

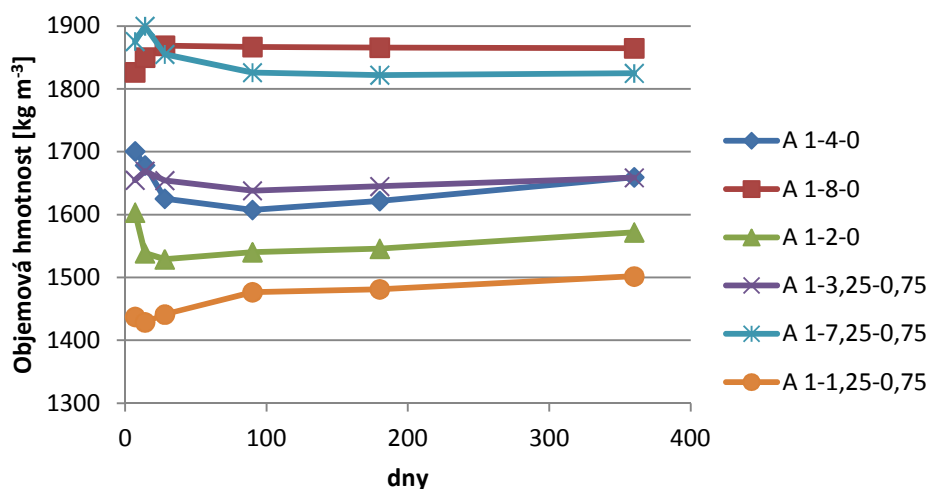
## 4. Výsledky a diskuze

### 4.1. Objemová hmotnost

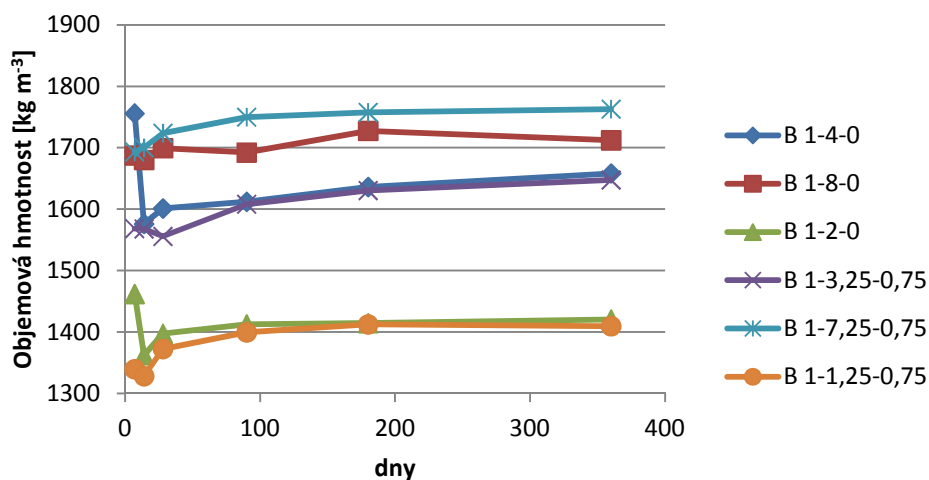
Před stanovením pevností v tahu za ohybu a tlaku byly vzorky zváženy a změřeny a byla vypočtena objemová hmotnost dané malty v daném čase. Výsledky byly zpracovány do tabulky 6 a grafů (obr. 14–20).

Tab. 6 Objemové hmotnosti vzorků malt

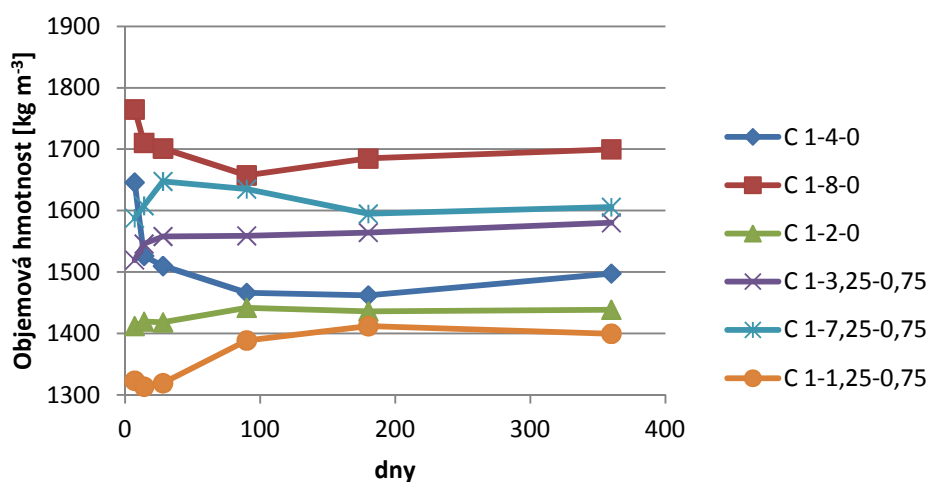
vzorek	7 d	14 d	28 d	90 d	180 d	365 d	365 d E
	[kg m <sup>-3</sup> ]	[kg m <sup>-3</sup> ]	[kg m <sup>-3</sup> ]	[kg m <sup>-3</sup> ]	[kg m <sup>-3</sup> ]	[kg m <sup>-3</sup> ]	[kg m <sup>-3</sup> ]
A 1-2-0	1605	1540	1530	1540	1545	1570	1600
A 1-4-0	1700	1680	1625	1610	1620	1660	1680
A 1-8-0	1825	1850	1870	1865	1865	1865	1890
B 1-2-0	1460	1360	1400	1415	1415	1420	1440
B 1-4-0	1755	1575	1600	1610	1635	1660	1655
B 1-8-0	1685	1680	1700	1690	1725	1710	1735
C 1-2-0	1410	1420	1420	1440	1435	1440	1495
C 1-4-0	1645	1525	1510	1465	1460	1500	1480
C 1-8-0	1765	1710	1700	1660	1685	1700	1595
A 1-1,25-0,75	1440	1430	1440	1475	1480	1500	1485
A 1-3,25-0,75	1655	1670	1655	1640	1645	1660	1645
A 1-7,25-0,75	1875	1900	1855	1825	1820	1825	1785
B 1-1,25-0,75	1340	1330	1375	1400	1415	1410	0
B 1-3,25-0,75	1570	1570	1555	1610	1630	1650	1635
B 1-7,25-0,75	1695	1700	1725	1750	1760	1765	1775
C 1-1,25-0,75	1325	1315	1320	1390	1410	1400	1415
C 1-3,25-0,75	1520	1545	1560	1560	1565	1580	1625
C 1-7,25-0,75	1590	1610	1650	1635	1595	1605	1615



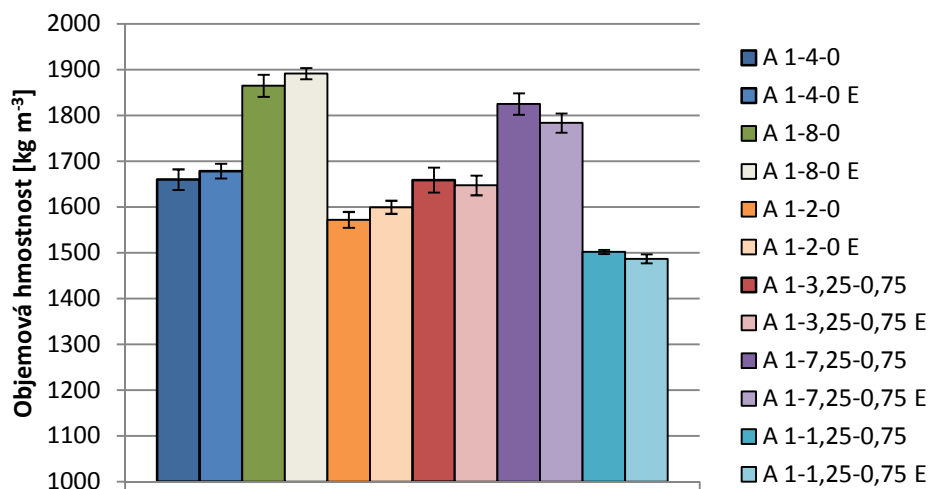
Obr. 14 Vývoj objemových hmotností vzorků A



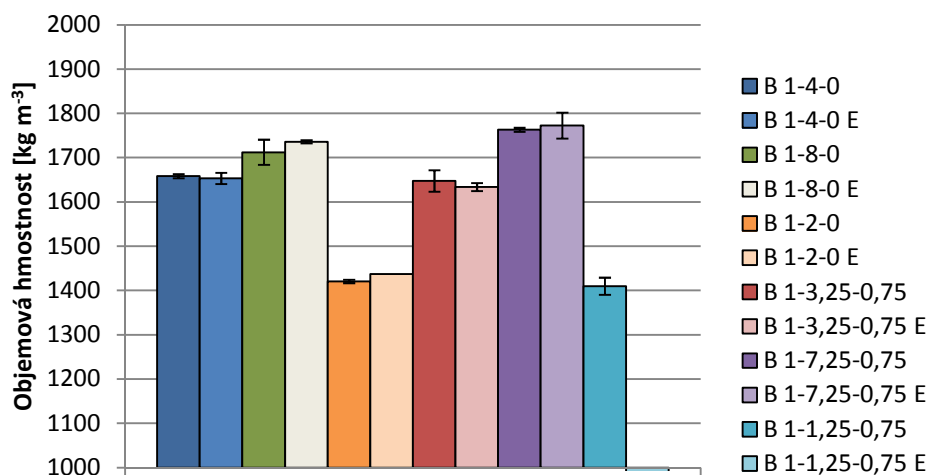
Obr. 15 Vývoj objemových hmotností vzorků B



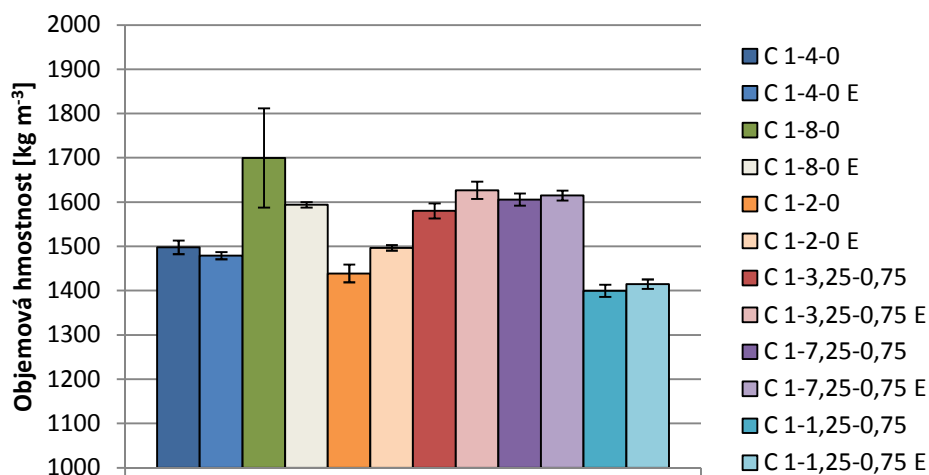
Obr. 16 Vývoj objemových hmotností vzorků C



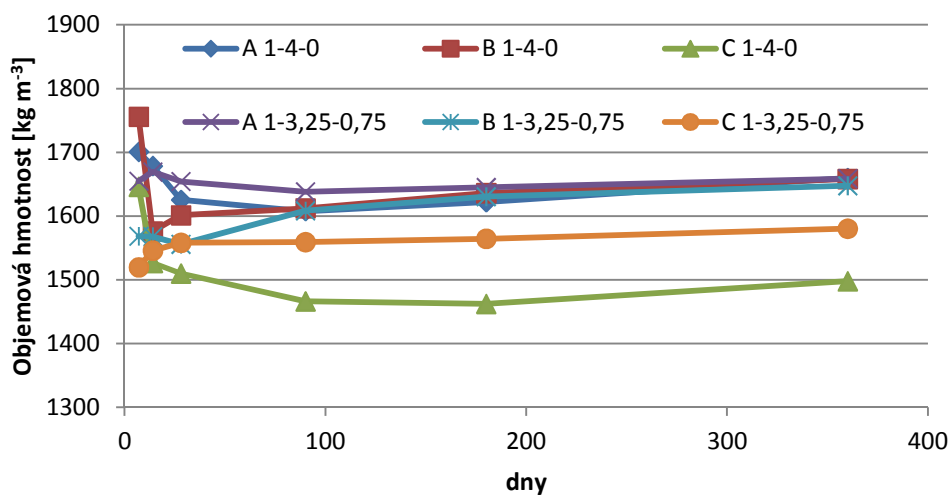
Obr. 17 Porovnání objemových hmotností vzorků A po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 18 Porovnání objemových hmotností vzorků B po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 19 Porovnání objemových hmotností vzorků C po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 20 Vývoj objemových hmotností vzorků s poměrem B/Ag 1 : 4

U všech vzorků lze pozorovat obdobný průběh vývoje objemových hmotností v závislosti na době zrání. Po prvních 28 dnech, kdy vzorky vysychají, a tím ztrácejí na hmotnosti, a zároveň již začínají podléhat karbonataci, díky které naopak vázáním CO<sub>2</sub> do struktury pojiva hmotnost nabírají, se objemové hmotnosti vzorků po 90 dnech ve většině případů ustálí a dále vzorky pouze pozvolna získávají hmotnost díky karbonataci. Je zde patrné, že čím větší je zastoupení kameniva ve vzorku (a tedy menší poměr B/Ag) tím je objemová hmotnost zatvrdlé malty větší, dále také, že přidavkem jemně mletého vápence především u malt A a B nijak výrazně neovlivníme objemovou hmotnost, pouze u poměru 1 : 2, kde je malé zastoupení kameniva a náhrada 0,75 dílu odpovídá 38 % kameniva ve srovnání s 9 % u poměru 1 : 8.

V porovnání jednotlivých kameniv vykazují vzorky vyrobené z čistě křemenného kameniva (A) nejvyšších objemových hmotností. Toto bylo očekáváno v návaznosti na zjištěné sypné hmotnosti kameniv (viz tab. 3).

V porovnání objemových hmotností vzorků uložených v laboratoři a v exteriéru jsou rozdíly vesměs nepatrné a uložení tedy nemá významnější vliv na objemovou hmotnost malty.

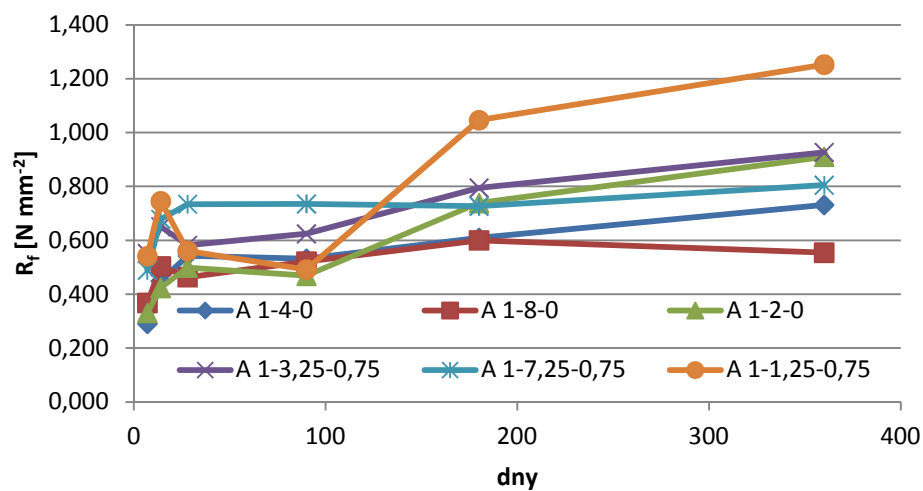
## 4.2 Pevnost v tahu za ohybu dle ČSN EN 1015–11

Pevnosti v tahu za ohybu byly stanoveny na vzorcích 40 × 40 × 160 mm pomocí trojbodého ohybu. Zlomky vzorků byly následně ponechány pro zkoušku pevnosti v tlaku.

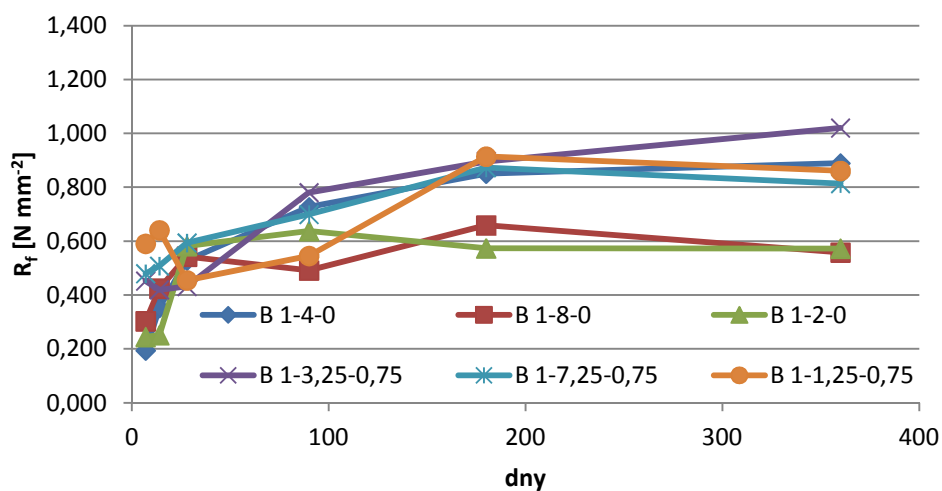
Tab. 7 Pevnosti v tahu za ohybu

vzorek	7 d	14 d	28 d	90 d	180 d	360 d	360 d E
	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]
A 1–2–0	0,35	0,40	0,50	0,45	0,75	0,90	1,15
A 1–4–0	0,30	0,45	0,55	0,55	0,60	0,75	1,05
A 1–8–0	0,35	0,50	0,45	0,50	0,60	0,55	0,95
B 1–2–0	0,25	0,25	0,60	0,65	0,55	0,55	0,55
B 1–4–0	0,20	0,35	0,55	0,75	0,85	0,90	1,05
B 1–8–0	0,30	0,40	0,55	0,50	0,65	0,55	0,65
C 1–2–0	0,35	0,50	0,60	0,60	0,80	0,90	1,50
C 1–4–0	0,20	0,45	0,45	0,50	0,65	0,70	0,80
C 1–8–0	0,30	0,50	0,75	0,50	0,65	0,60	0,70
A 1–1,25–0,75	0,55	0,75	0,55	0,50	1,05	1,25	1,55
A 1–3,25–0,75	0,55	0,65	0,60	0,60	0,80	0,95	1,10
A 1–7,25–0,75	0,50	0,70	0,75	0,75	0,75	0,80	1,00
B 1–1,25–0,75	0,60	0,65	0,45	0,55	0,90	0,85	0,00
B 1–3,25–0,75	0,45	0,40	0,45	0,80	0,90	1,00	1,30
B 1–7,25–0,75	0,50	0,50	0,60	0,70	0,85	0,80	1,10
C 1–1,25–0,75	0,60	0,75	0,80	0,90	1,00	1,60	1,85
C 1–3,25–0,75	0,55	0,80	0,85	0,75	0,85	1,10	1,40
C 1–7,25–0,75	0,50	0,65	0,80	0,65	0,75	0,75	1,05

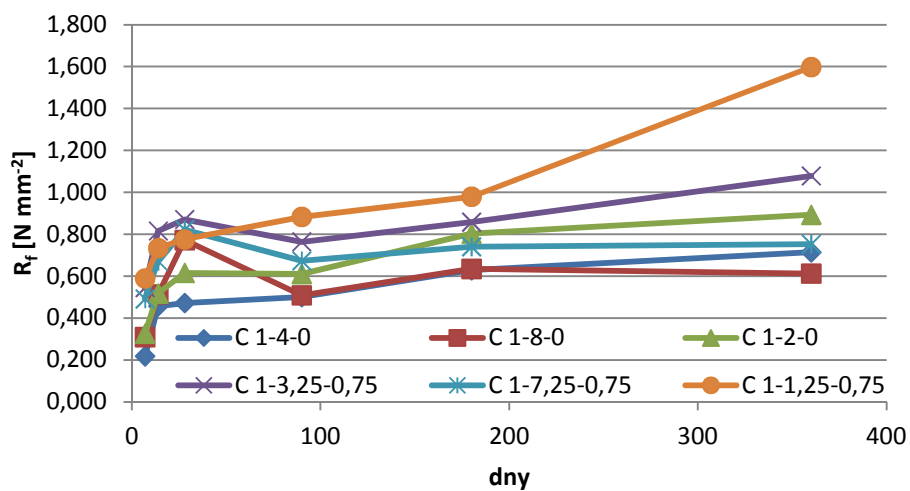




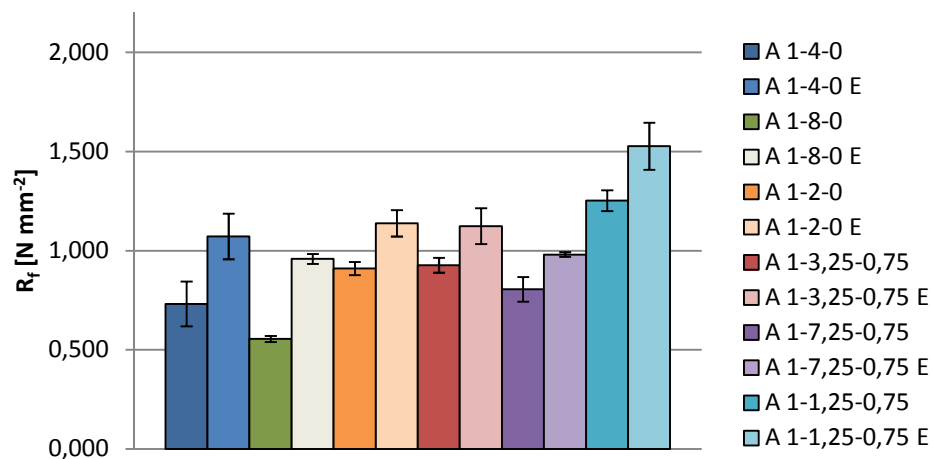
Obr. 21 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků A



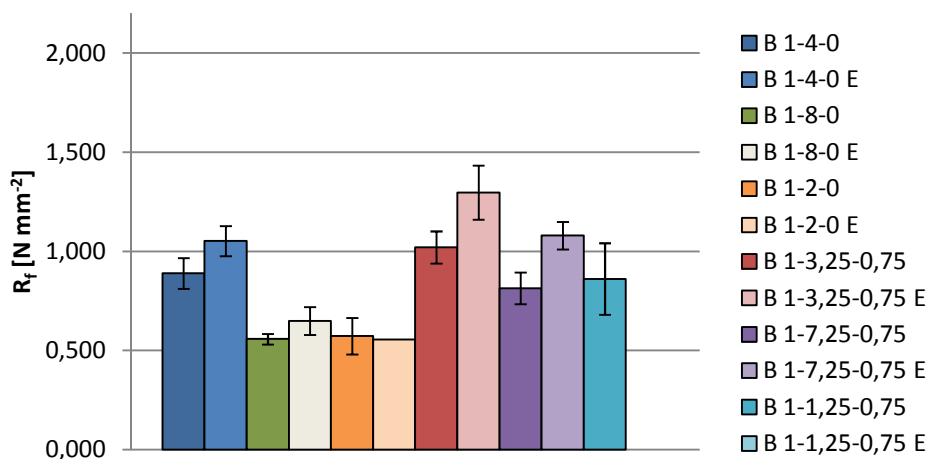
Obr. 22 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků B



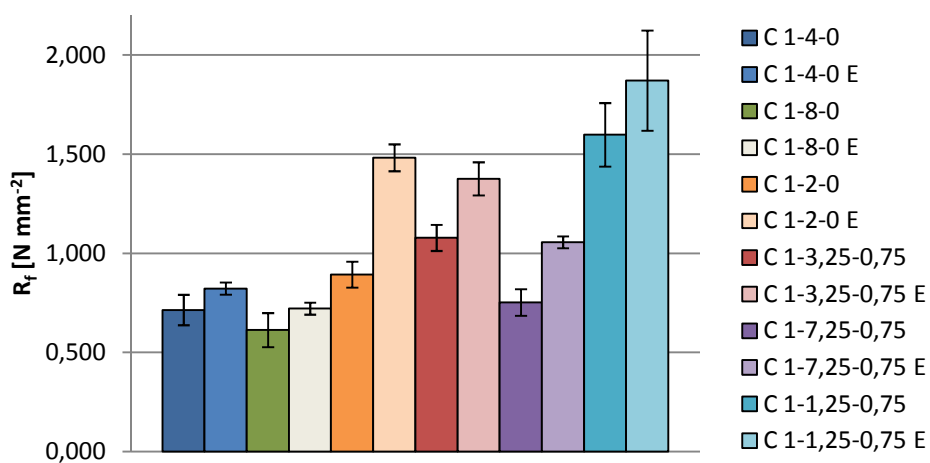
Obr. 23 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků C



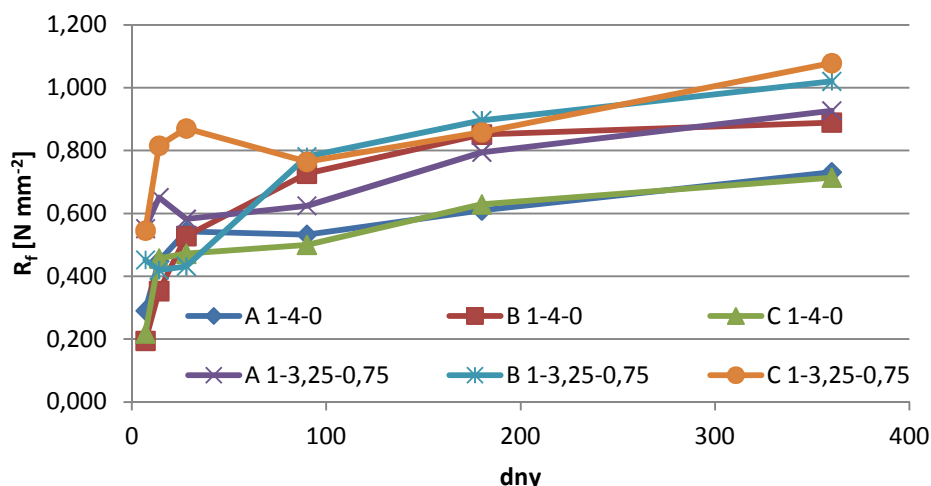
Obr. 24 Porovnání pevností v tahu za ohybu vzorků A po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 25 Porovnání pevností v tahu za ohybu vzorků B po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 26 Porovnání pevností v tahu za ohybu vzorků C po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 27 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků s poměrem B/Ag 1 : 4

Z grafů na obr. 20–23 a 27 vidíme, že ve vápenných maltách je vývin pevností velmi pomalý a ve většině případů ještě pokračuje i po 180 dnech od přípravy malty. Toto je způsobeno nízkou rychlostí karbonatace. Vápenná malta se nejdříve vytvrzuje pouze vysušením a následně pomalu probíhá její karbonatace. V prvních týdnech je prudký nárůst pevnosti způsoben tedy spíše pouhým vysycháním vzorků. U vzorků s poměrem B/Ag 1 : 8 již není pozorován žádný nárůst pevností mezi 180 a 365 dny a je tedy pravděpodobné, že již po 180 dnech byly vzorky celé zkarbonatované, především díky nízkému objemu pojiva ve vzorku.

Malty s vyšším poměrem B/Ag vykazují vyšších pevností u kameniva A a C. U směsného kameniva B nejlépe vychází poměr B/Ag 1 : 4. Tyto výsledky potvrzují výsledky J. I. Alvareze [7] a dalších autorů zpracované v kapitole 2.3.

Malty s vápencovým kamenivem vykazují stejné anebo vyšší pevnosti než vzorky s kamenivem křemenným. Tímto se potvrzují závěry z kapitoly 2.4.2. Podíváme-li se na výsledky v širších souvislostech, musíme si uvědomit, že pro přípravu vzorků z vápencového kameniva bylo použito vždy více záměsové vody, než pro vzorky z kameniva křemenného. Tato voda se následně v prvotních fázích tuhnutí malty vypařuje a proniká z hmoty malty na povrch a do okolního prostředí a zanechává za sebou kapiláry, které zvyšují porozitu malty, která je nepřímo úměrná výsledným fyzikálně mechanickým vlastnostem. Lze tedy předpokládat, že při použití stejného množství záměsové vody pro vzorky A i C by vzorky C vykazovaly lepší vlastnosti než vzorky A.

Přídavek jemně mletého vápence do malty způsobil nárůst konečných pevností o desítky procent ve srovnání s maltou stejného poměru B/Ag bez jemně mletého vápence. Zajímavé jsou především výsledky malt 1–7,25–0,75, které dosahovaly mírně vyšších konečných pevností než vzorky 1–4–0 stejného

kameniva a měly rychlejší vývin pevností. Přídavek jemně mletého vápence potvrdil předpoklady kapitoly 2.4.3.

Při porovnání vzorků uložených 365 dní v laboratoři a vzorků uložených v laboratoři 7 dní a následných 358 dní ve venkovním prostředí získáme poměrně zajímavé výsledky. Vzorky uložené v exteriéru dosáhly ve všech případech vyšších pevností než jejich protějšky uložené v laboratoři. Venkovní prostředí má pro karbonataci a tedy i výsledné pevnosti lepší podmínky než sušší ovzduší v laboratoři. Vlhkost vzduchu, která zásadně ovlivňuje rychlost karbonatace (obr. 8) je v exteriéru, i když v průběhu dne i roku kolísá, v konečném výsledku vyšší než v laboratoři, a tedy vzorky lépe karbonatují. Výjimkou byly vzorky B 1–2–0, které se při venkovním uložení rozpadly (použitelný pro zkoušky zůstal pouze jeden vzorek (obr. 28)). Avšak i v laboratoři dosáhly vzorky této záměsi v porovnání se vzorky ostatních kameniv se stejným B/Ag nízkých pevností. Rovněž u vzorků B 1–1,25–0,75 došlo ve venkovním prostředí k jejich rozpadu (obr. 29)



*Obr. 28 Vzorky B 1–2–0 E*



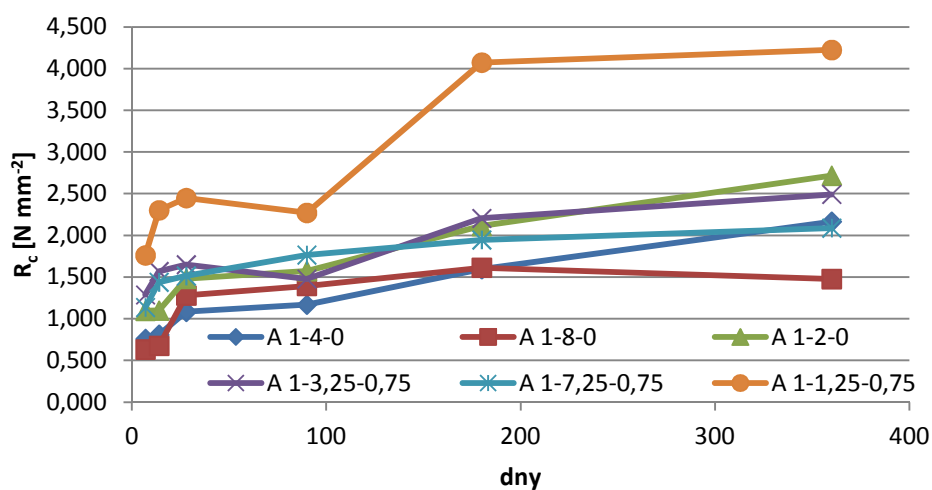
*Obr. 29 Vzorky B 1–1,25–0,75 E*

#### **4.3 Pevnost v tlaku dle ČSN EN 1015–11**

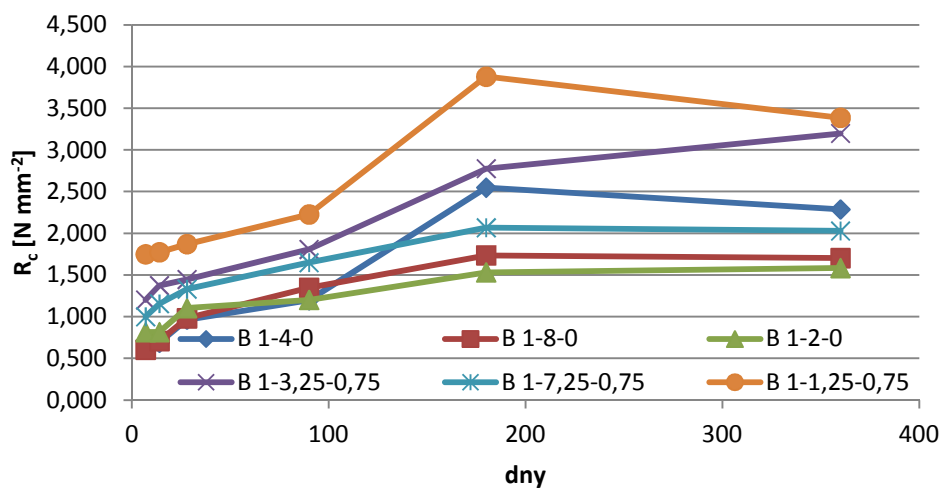
Pevnost v tlaku vzorků byla stanovena na zlomcích po zkouškách pevnosti v tahu za ohybu pomocí přípravku s tlačnou plochou 40 × 40 mm.

Tab. 8 Pevnosti v tlaku

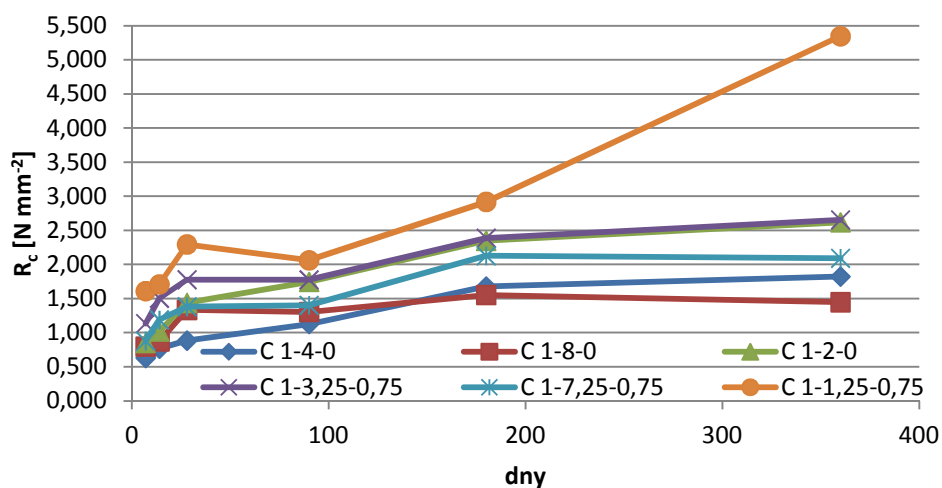
vzorek	7 d	14 d	28 d	90 d	180 d	360 d	360 d E
	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]	[N mm <sup>-2</sup> ]
A 1-2-0	1,10	1,10	1,50	1,55	2,10	2,70	3,30
A 1-4-0	0,75	0,80	1,10	1,15	1,60	2,15	2,85
A 1-8-0	0,65	0,70	1,30	1,40	1,60	1,50	2,70
B 1-2-0	0,80	0,80	1,10	1,20	1,55	1,60	1,65
B 1-4-0	0,70	0,70	0,95	1,20	2,55	2,30	3,15
B 1-8-0	0,60	0,70	1,00	1,35	1,75	1,70	1,90
C 1-2-0	0,85	1,00	1,45	1,75	2,35	2,60	3,95
C 1-4-0	0,65	0,75	0,90	1,15	1,70	1,80	2,65
C 1-8-0	0,80	0,90	1,35	1,30	1,55	1,45	2,20
A 1-1,25-0,75	1,75	2,30	2,45	2,25	4,05	4,20	5,50
A 1-3,25-0,75	1,30	1,55	1,65	1,50	2,20	2,50	4,40
A 1-7,25-0,75	1,15	1,45	1,50	1,75	1,95	2,10	3,80
B 1-1,25-0,75	1,75	1,75	1,85	2,25	3,90	3,40	0,00
B 1-3,25-0,75	1,20	1,35	1,45	1,80	2,75	3,20	4,05
B 1-7,25-0,75	1,00	1,15	1,35	1,65	2,05	2,05	3,05
C 1-1,25-0,75	1,60	1,70	2,30	2,05	2,90	5,35	4,85
C 1-3,25-0,75	1,15	1,50	1,80	1,80	2,40	2,65	4,35
C 1-7,25-0,75	0,90	1,20	1,40	1,40	2,15	2,10	3,30



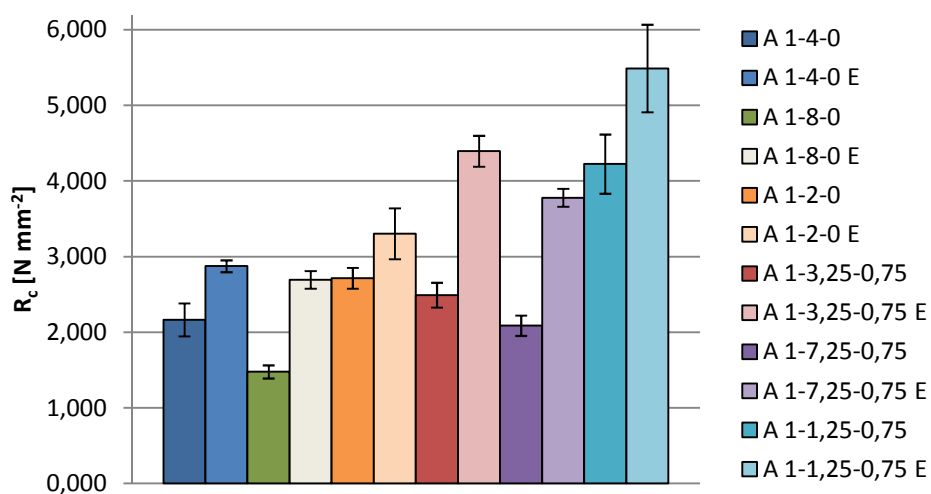
Obr. 30 Vývoj pevností v tlaku vzorků A



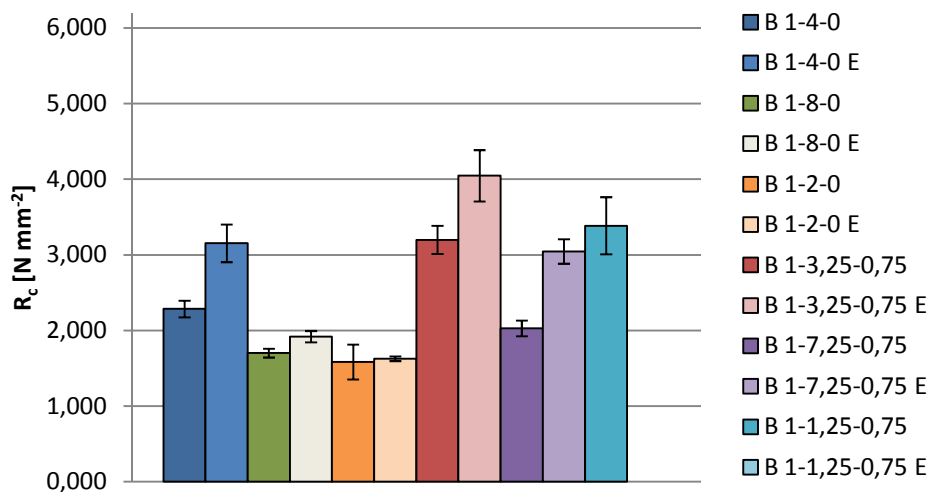
Obr. 31 Vývoj pevností v tlaku vzorků B



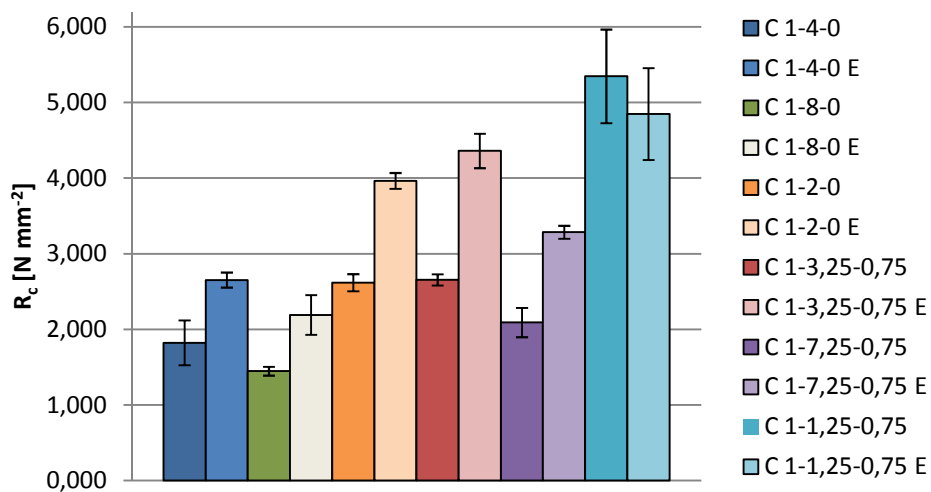
Obr. 32 Vývoj pevností v tlaku vzorků C



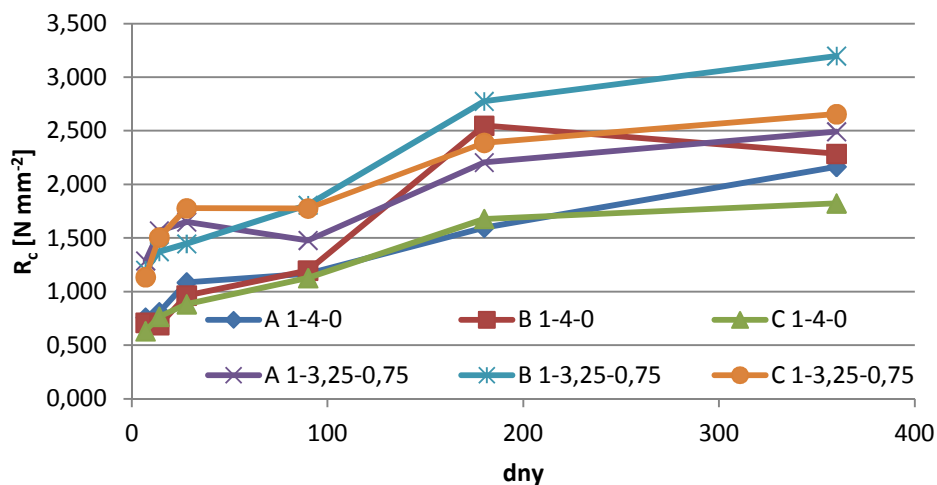
Obr. 33 Porovnání pevností v tlaku vzorků A po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 34 Porovnání pevností v tlaku vzorků B po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 35 Porovnání pevností v tlaku vzorků C po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 36 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků s poměrem B/Ag 1 : 4

Výsledky zkoušek pevností v tlaku do jisté míry kopírují výsledky zkoušek pevností v tahu za ohybu, a tím dokazují svou vzájemnou provázanost. Tedy i zde dosahují vyšších pevností vzorky s vyšším poměrem B/Ag.

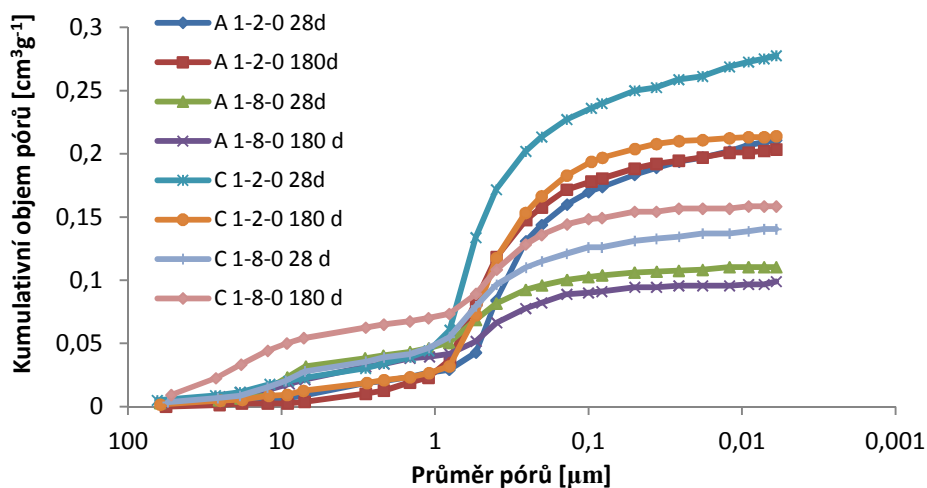
V porovnání jednotlivých kameniv je pro použití při aplikacích vyžadujících pevnosti především v tlaku nejvhodnější kamenivo smíšené (B), jehož použití vede k vyšším pevnostem vápenných malt, výjimkou je opět malta B 1–2–0, která i zde vybočuje z předpokládaného vývoje pevností. Kamenivo vápencové obdobně jako při zkouškách pevnosti v tahu za ohybu dosahuje stejných anebo vyšších pevností než kamenivo křemenné.

Přídavek jemně mletého vápence ve všech případech opět příznivě ovlivňuje pevnosti v tlaku. Opět je zde téměř shoda ve výsledných pevnostech vzorků 1–7,25–0,75 a 1–4–0.

U vzorků uložených v exteriéru můžeme opět pozorovat vyšší pevnosti než u vzorků uložených v laboratoři. I vzorek B 1–2–0, vykazoval mírně vyšších pevností u vzorku uloženého v exteriéru.

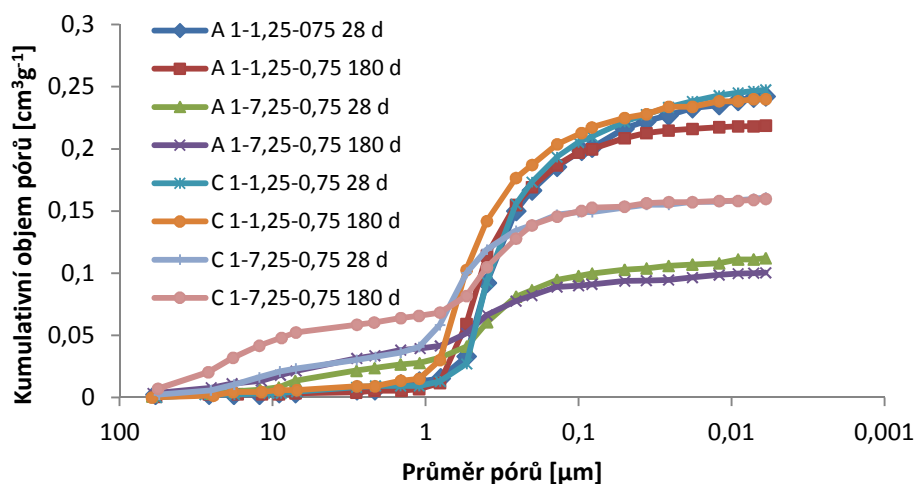
#### 4.4 Porozimetrie

Na vzorcích malt A a C s poměrem B/Ag 1 : 2 a 1 : 8 byla po 28, 180 a 365 dnech rtuťovou vysokotlakou porozimetrií stanovena celková porozita a kumulativní objem pórů.

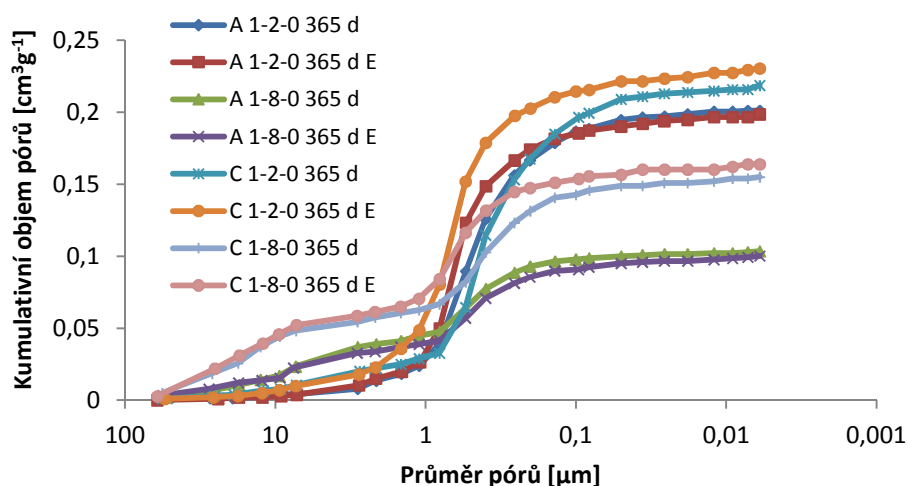


Obr. 37 Porovnání křivek kumulativního objemu pórů vzorků A a C poměrů 1–2–0 a 1–8–0 po 28 a 180 dnech zrání

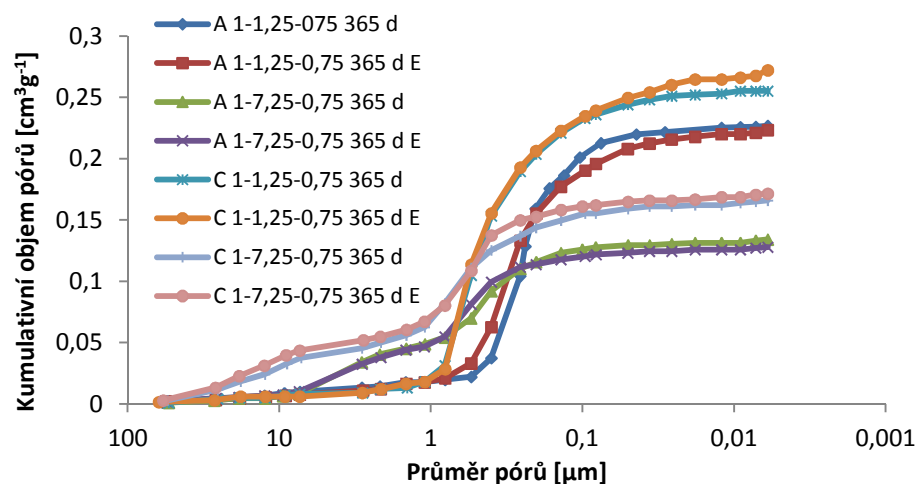




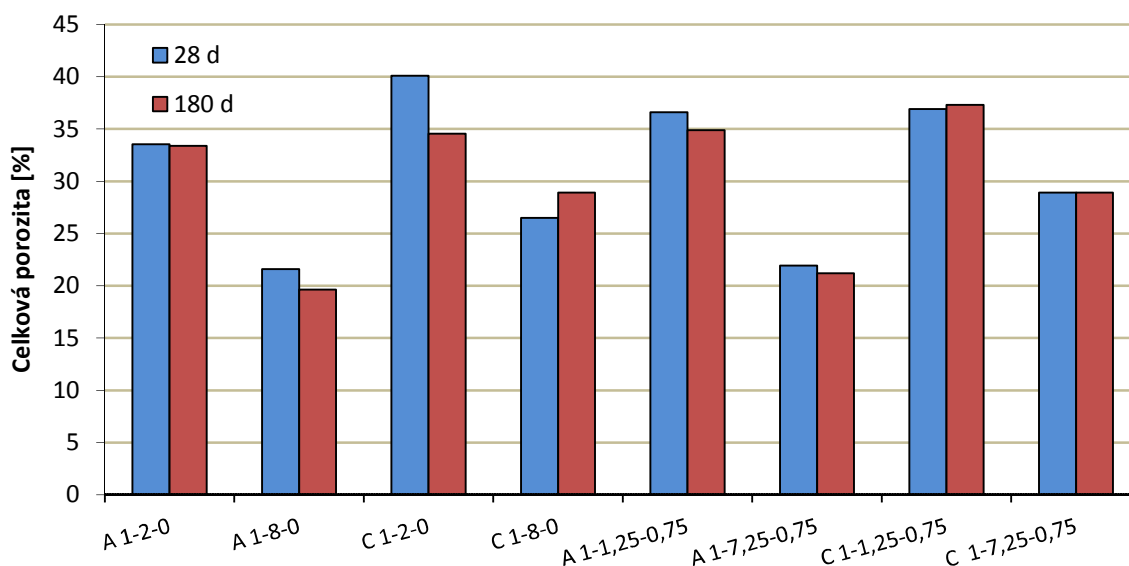
Obr. 38 Porovnání křivek kumulativního objemu pórů vzorků A a C poměrů 1–1,25–0,75 a 1–7,25–0,75 po 28 a 180 dnech zrání



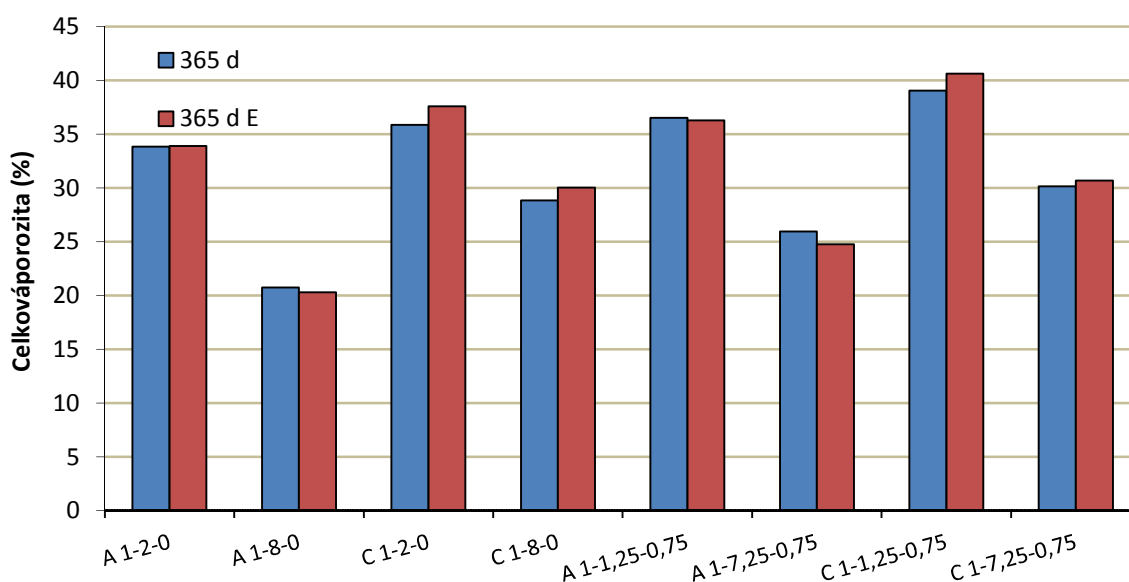
Obr. 39 Porovnání křivek kumulativního objemu pórů vzorků A a C poměrů 1–2–0 a 1–8–0 po 365 dnech zrání v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 40 Porovnání křivek kumulativního objemu pórů vzorků A a C poměrů 1–1,25–0,75 a 1–7,25–0,75 po 365 dnech zrání v laboratoři (-) a v exteriéru (E)



Obr. 41 Porovnání celkové porozity vzorků malt po 28 a 180 dnech zrání



Obr. 42 Porovnání celkové porozity vzorků malt po 365 dnech zrání v laboratoři (-) a v exteriéru (E)

Z grafů porovnávajících celkovou porozitu na obr. 41 a 42 je zřejmá závislost porozity na poměru B/Ag, kdy s rostoucím poměrem roste i celková porozita dané malty v rozmezí 20 % (A 1–8–0) až 40 % (C 1–1,25–0,75). Malty s vápencovým kamenivem vykazují vyšší celkovou porozitu než malty s kamenivem křemenným, toto koresponduje s vyšším množstvím vody použitým pro přípravu těchto malt. Vidíme, že způsob ošetřování nemá téměř žádný vliv na celkovou porozitu, protože rozdíly hodnot jsou velmi malé. Mírný pokles u vzorků A a naopak mírný nárůst u vzorků C může být způsoben lepšími podmínkami pro karbonataci v exteriéru. Zatímco u vzorků A toto vede k dokonalejšímu vyplnění pórů výsledky karbonatace, u vzorků C může vápencové

kamenivo přispět k dokonalejšímu růstu větších krystalů kalcitu, mezi kterými může vzniknout poréznější struktura. Přídavkem jemně mletého vápence roste i celková porozita dané malty. Je zde i korelace mezi porozitou a pevnostmi malt, čím vyšší je celková porozita, tím vyšší je i výsledná pevnost. Tato přímá závislost mezi těmito veličinami je pro malty ze vzdušného vápna typická [7].

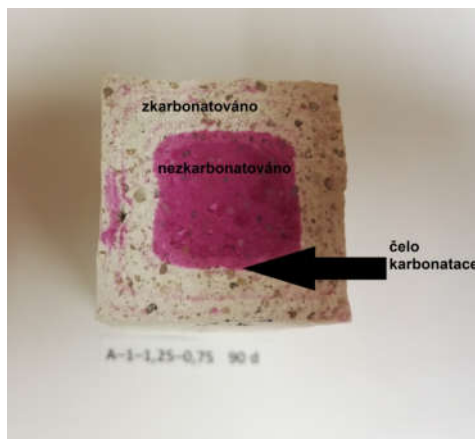
Vzorky malt obsahují v převážné většině velké kapilární póry s průměrem blízcím se 1  $\mu\text{m}$ . Z grafů kumulativního objemu pórů (obr. 37–40) lze zjistit, že malty s křemenným kamenivem mají póry s menším průměrem než vzorky s kamenivem vápencovým, tento rozdíl může být podpořen rozdílným tvarem zrn těchto kameniv. Přídavkem jemně mletého vápence se velikost pórů sníží (porovnání grafů na obr. 39 a 40). Z těchto grafů je také patrný výše popsany minimální až žádný vliv způsobu a doby ošetřování vzorků na výsledné porozity malt, kdy se křivky kumulativního objemu pórů po 365 dnech v exteriéru a v laboratoři téměř kopírují. Je patrný také vliv poměru B/Ag, kdy vzorky s poměrem 1 : 8 obsahují i výrazné množství pórů o velikosti 5  $\mu\text{m}$

## 4.5 Karbonatace

Hloubka karbonatace malt byla sledována pomocí fenolftaleinového testu, založeném na barevné změně indikátoru v závislosti na pH vzorku a pomocí diferenčně termické analýzy (DTA), kde se sledovala hmotnostní změna vzorku při teplotách kolem 450 °C, kdy dochází k dehydroxylaci portlanditu a při teplotách nad 700 °C, kdy se začínají rozkládat modifikace  $\text{CaCO}_3$  a unikající  $\text{CO}_2$  způsobuje pokles hmotnosti vzorku. Následně bylo přepočtem stanoveno množství portlanditu a  $\text{CaCO}_3$  ve vzorku.

### 4.5.1 Stanovení hloubky karbonatace pomocí fenolftaleinového testu

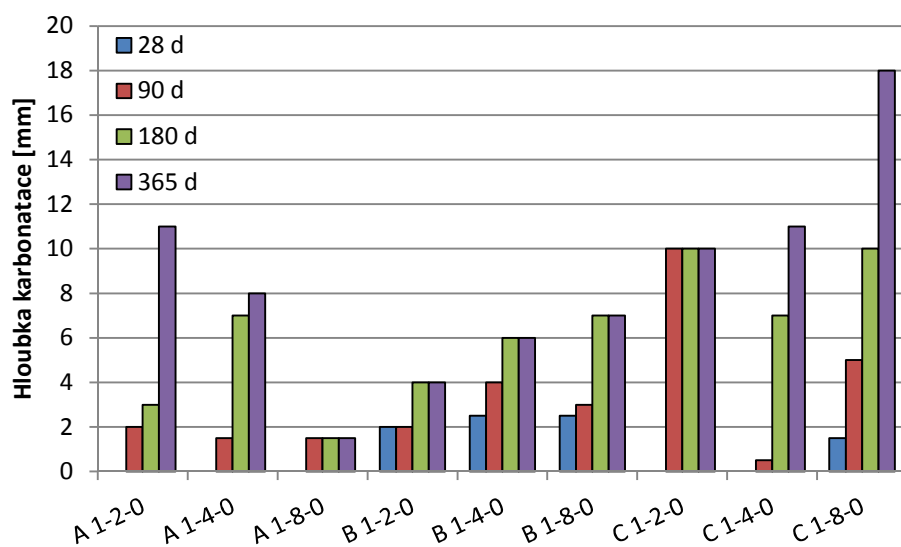
Z trámečku uloženého v laboratoři byla odlomena čelní plocha a na plochu po čerstvém lomu byl nastříkán roztok fenolftaleinu v ethanolu a sledovala se změna zbarvení indikátoru (obr. 43). Následně byla změřena hloubka čela karbonatace od povrchu vzorku. Získané hodnoty jsou porovnány v tab. 9 a na obr. 44–45.



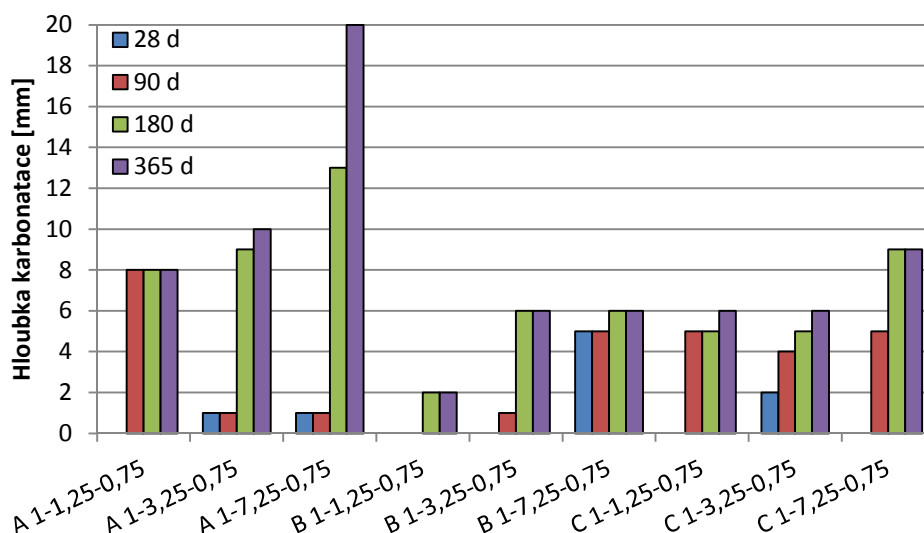
Obr. 43 Fenolftaleinový test vzorku A 1–1,25–0,75 po 90 dnech zrání

Tab. 9 Hloubka karbonatce malt stanovená fenolftaleinovým testem

vzorek	28 d	90 d	180 d	365 d
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A 1-2-0	0,0	2,0	3,0	11,0
A 1-4-0	0,0	1,5	7,0	8,0
A 1-8-0	0,0	1,5	1,5	1,5
B 1-2-0	2,0	2,0	4,0	4,0
B 1-4-0	2,5	4,0	6,0	6,0
B 1-8-0	2,5	3,0	7,0	7,0
C 1-2-0	0,0	10,0	10,0	10,0
C 1-4-0	0,0	0,5	7,0	11,0
C 1-8-0	1,5	5,0	10,0	18,0
A 1-1,25-0,75	0,0	8,0	8,0	8,0
A 1-3,25-0,75	1,0	1,0	9,0	10,0
A 1-7,25-0,75	1,0	1,0	13,0	20,0
B 1-1,25-0,75	0,0	0,0	2,0	2,0
B 1-3,25-0,75	0,0	1,0	6,0	6,0
B 1-7,25-0,75	5,0	5,0	6,0	6,0
C 1-1,25-0,75	0,0	5,0	5,0	6,0
C 1-3,25-0,75	2,0	4,0	5,0	6,0
C 1-7,25-0,75	0,0	5,0	9,0	9,0



Obr. 44 Grafické porovnání hloubky karbonatce malt



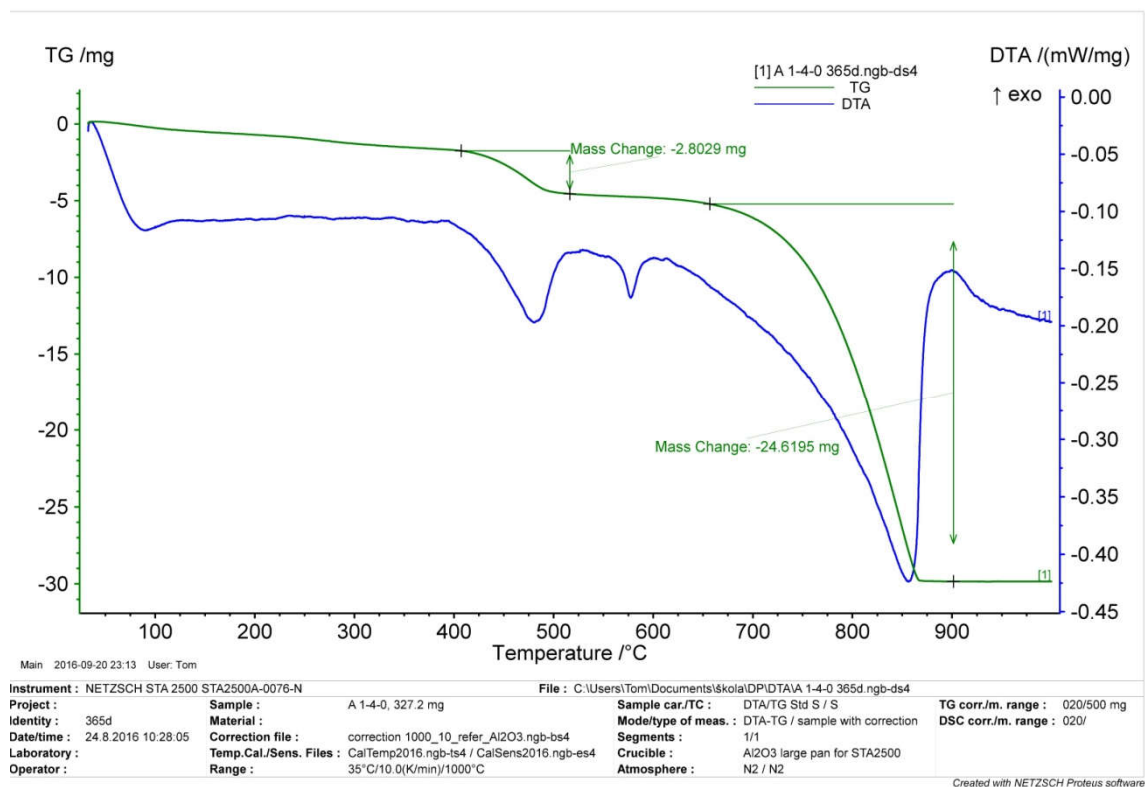
Obr. 45 Grafické porovnání hloubky karbonatace ve vzorcích s jemně mletým vápencem

Z tabulky 9 a grafů na obr. 44 a 45 je patrné, že hloubka karbonatace s postupem času u většiny vzorků roste. Po 28 dnech zrání jsou zkarbonatované pouze vzorky s kamenivem B bez přidaného vápence a vzorek C 1–8–0. Přídavkem jemně mletého vápence se dosáhlo mírné karbonatace i u vzorků s kamenivem A a výraznějšího zkarbonátování u vzorku B 1–7,25–0,75. Je zde tedy zřejmý vliv přítomného vápence na rychlost karbonatace. Do větší hloubky také zkarbonatovaly vzorky s menším objemem pojiva (B/Ag 1 : 8). Dle fenolftaleinové testu dosáhly úplné karbonatace po 365 dnech pouze vzorky C 1–8–0 a A 1–7,25–0,75.

#### 4.5.2 Sledování stupně karbonatace pomocí DTA

Po zkoušce pevnosti v tlaku se úlomek vzorku reprezentující příčný průřez vzorkem rozešel v hmoždířovém drtiči, kde se mlet po dobu pěti minut. Z takto rozemletého vzorku bylo pro termickou analýzu na termogravimetru NETZSCH STA 2500 naváženo 100–300 mg. Sledovány byly změny hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě (TG) a souběžně i měření spotřeby energie vzhledem k referenčnímu vzorku korundu (DTA). Z výsledných grafů byly odečteny hmotnostní změny při cca 450 °C a 700 °C a z těchto vypočteny procentuální obsahy  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $\text{CaCO}_3$  ve vzorku.

Na obr. 46 jsou uvedeny termoanalytické křivky vzorku A 1–4–0 po 365 dnech v laboratoři. Zelená křivka (TG) zachycuje změny hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě a modrá křivka (DTA) zobrazuje exotermické a endotermické děje probíhající při konkrétních teplotách. Lokální minima značí v tomto případě endotermický děj, tedy děj, při kterém se teplo spotřebovává, mezi tyto děje patří právě i dehydroxylace  $\text{Ca(OH)}_2$  a kalcinace  $\text{CaCO}_3$ . Při teplotě 573 °C dochází k modifikační přeměně křemene z  $\beta$ -křemene na  $\alpha$ -křemen, při této přeměně nedochází ke změnám hmotnosti. Tato přeměna je také endotermická.



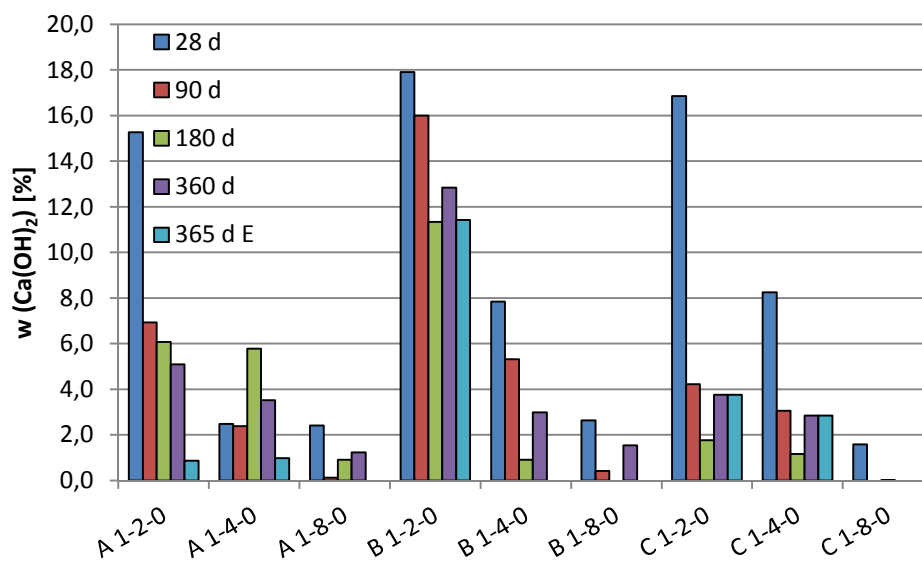
Obr. 46 Termoanalytické křivky vzorku A 1–4–0 po 365 dnech zrání

Tab.10 Množství  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $\text{CaCO}_3$  ve vzorcích po 28, 90 a 180 dnech zrání

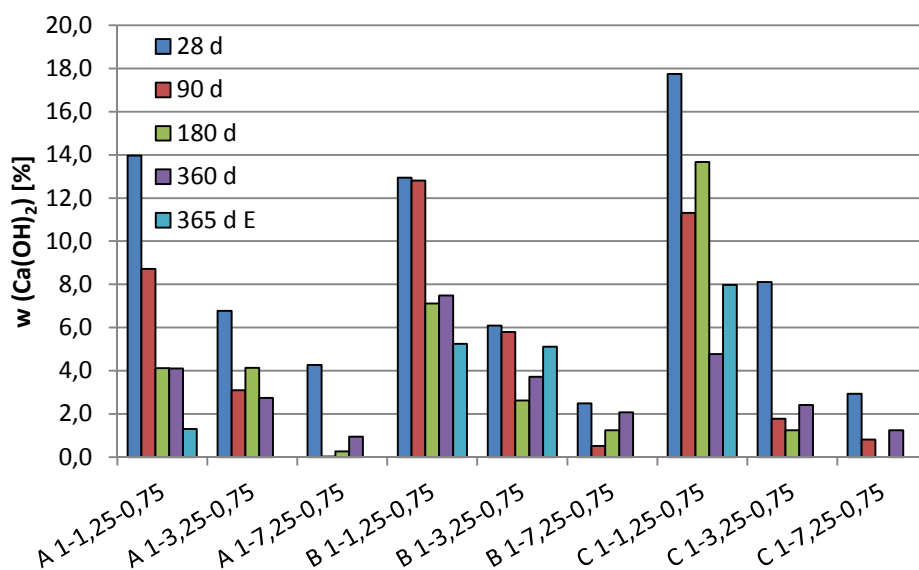
vzorek	28 d		90 d		180 d	
	% $\text{Ca(OH)}_2$	% $\text{CaCO}_3$	% $\text{Ca(OH)}_2$	% $\text{CaCO}_3$	% $\text{Ca(OH)}_2$	% $\text{CaCO}_3$
A 1–2–0	15,3	18,7	6,9	22,6	6,1	25,1
A 1–4–0	2,5	53,2	2,4	18,6	5,8	21,0
A 1–8–0	2,4	10,0	0,1	10,7	0,9	10,2
B 1–2–0	17,9	41,3	16,0	50,0	11,3	49,4
B 1–4–0	7,8	50,7	5,3	49,9	0,9	58,5
B 1–8–0	2,6	48,0	0,4	54,1	0,0	56,3
C 1–2–0	16,8	74,8	4,2	88,5	1,8	90,0
C 1–4–0	8,3	84,6	3,1	82,9	1,2	92,2
C 1–8–0	1,6	91,9	0,0	93,4	0,0	93,6
A 1–1,25–0,75	14,0	34,9	8,7	43,9	4,1	52,2
A 1–3,25–0,75	6,8	29,6	3,1	30,0	4,1	31,8
A 1–7,25–0,75	4,3	15,7	0,0	22,3	0,3	20,3
B 1–1,25–0,75	12,9	55,9	12,8	65,5	7,1	69,6
B 1–3,25–0,75	6,1	59,0	5,8	58,8	2,6	59,6
B 1–7,25–0,75	2,5	53,2	0,5	58,3	1,2	58,4
C 1–1,25–0,75	17,7	75,8	11,3	81,5	13,7	81,7
C 1–3,25–0,75	8,1	85,4	1,8	92,4	1,2	93,5
C 1–7,25–0,75	2,9	90,9	0,8	93,5	0,0	95,0

Tab. 11 Množství  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $\text{CaCO}_3$  ve vzorcích po 28, 90 a 180 dnech zrání

vzorek	365 dní		365 dní Exteriér	
	% $\text{Ca(OH)}_2$	% $\text{CaCO}_3$	% $\text{Ca(OH)}_2$	% $\text{CaCO}_3$
A 1-2-0	5,1	26,3	0,9	31,9
A 1-4-0	3,5	17,1	1,0	20,3
A 1-8-0	1,2	8,9	0,0	10,5
B 1-2-0	12,8	48,4	11,4	47,1
B 1-4-0	3,0	54,5	0,0	55,9
B 1-8-0	1,5	51,4	0,0	51,8
C 1-2-0	3,8	88,2	3,8	88,2
C 1-4-0	2,8	89,7	2,8	89,7
C 1-8-0	0,0	91,6	0,0	91,6
A 1-1,25-0,75	4,1	51,4	1,3	53,2
A 1-3,25-0,75	2,7	30,3	0,0	34,4
A 1-7,25-0,75	0,9	17,4	0,0	18,5
B 1-1,25-0,75	7,5	66,5	5,2	65,6
B 1-3,25-0,75	3,7	58,7	5,1	66,1
B 1-7,25-0,75	2,1	53,6	0,0	56,2
C 1-1,25-0,75	4,8	85,5	8,0	85,2
C 1-3,25-0,75	2,4	90,3	0,0	92,0
C 1-7,25-0,75	1,2	91,2	0,0	92,6



Obr. 47 Porovnání obsahu  $\text{Ca(OH)}_2$  ve vzorcích malt v závislosti na době zrání



Obr. 48 Porovnání obsahu  $\text{Ca(OH)}_2$  ve vzorcích malt s jemně mletým vápencem v závislosti na době zrání

V grafech na obr. 47 a 48 můžeme pozorovat klesající trend obsahu  $\text{Ca(OH)}_2$  ve vzorcích v závislosti na době zrání. Nižší obsah  $\text{Ca(OH)}_2$  ve vzorcích s vyšším poměrem B/Ag je dán již tímto poměrem, kdy vzorky s B/Ag 1 : 2 obsahují teoreticky 30 % hm.  $\text{Ca(OH)}_2$  zatímco vzorky 1 : 4 cca 18 % respektive 11 % pro vzorky s B/Ag 1 : 8. S tímto koresponduje i rychlejší dosažení velmi malého obsahu  $\text{Ca(OH)}_2$  ve vzorku a tím i zjištěná větší míra karbonatace fenolftaleinovým testem v kapitole 4.5.1. Je zřejmé, že vzorky s kamenivem C dosáhly dříve menšího obsahu portlanditu než vzorky s kamenivem A a B. Je zde vidět značný vliv uložení v exteriéru na obsah portlanditu a tedy i rychlost karbonatace, některé vzorky ve venkovním prostředí v porovnání s interiérem zkarbonatovaly úplně, u dalších je pozorován značný pokles obsahu  $\text{Ca(OH)}_2$ . Přídavek jemně mletého vápence pozitivně ovlivnil průběh karbonatace především v maltách s křemenným kamenivem, malty s kamenivem B a C již vápenec obsahují a tedy jeho další přídavek nemá tak značný vliv na sledované vlastnosti.

V tab. 10 a 11 je uveden i obsah  $\text{CaCO}_3$  ve vzorcích, který s narůstajícím časem díky probíhající karbonataci narůstá. Toto je u malt s vápencovým kamenivem či přidaným jemně mletým vápencem zkresleno  $\text{CaCO}_3$  obsaženým ve vápenci, avšak i zde je patrný další nárůst obsahu  $\text{CaCO}_3$  v čase.

Drobné anomálie ve výsledcích, například nárůst obsahu  $\text{Ca(OH)}_2$  po určitém časovém úseku, jsou způsobeny drobnými chybami měření a odběru vzorků, protože byť mletím na jemný podíl se docílilo zároveň i velmi dobré homogenizace, je i přesto možný vliv heterogenity původní malty.

I přes tyto nepřesnosti lze z výsledků přisuzovat vápenci pozitivní vliv na průběh karbonatace, pravděpodobně v důsledku syntaxiálního růstu krystalů na krystalizačních jádrech kameniva. Výsledky z TG a DTA analýzy se zdají být



přesnější a lépe odpovídající teoretickým předpokladům průběhu karbonatace než výsledky fenolftaleinového testu, který je praktickým a velmi jednoduchým, avšak pouze orientačním způsobem stanovení míry karbonatace daného vzorku.

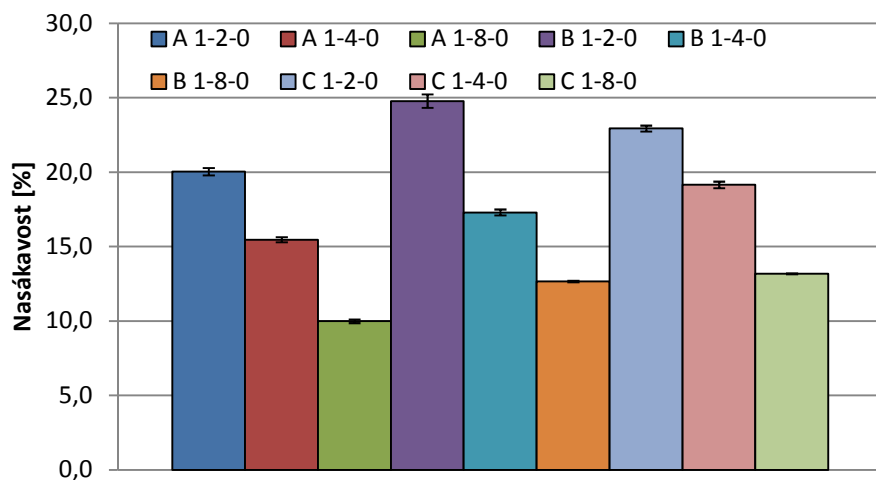
#### 4.6 Stanovení nasákavosti dle ČSN EN 13755

Po 28 dnech zrání byla sada tří vzorků uložena na 24 hodin do vody a následně zvážena, vysušena při 80 °C do konstantní hmotnosti a následně opět zvážena. Z těchto hmotností bylo vypočteno celkové množství vody nasáklé ve vzorku. Výsledky byly zpracovány do tabulky 12.

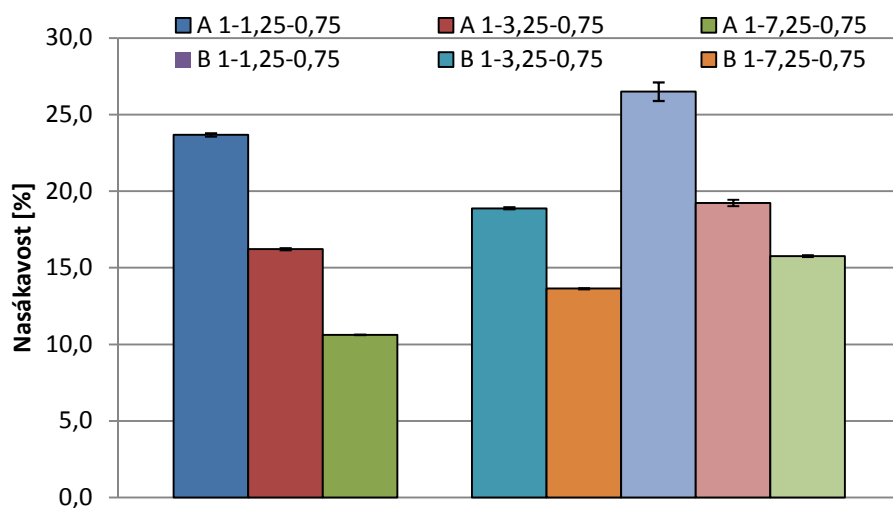
*Tab. 12 Hodnoty přirozené vlhkosti a nasákavosti vzorků malt.*

vzorek	přirozená vlhkost	nasákavost
	[hm. %]	[hm. %]
A 1–2–0	0,45	20,0
A 1–4–0	0,32	15,5
A 1–8–0	0,22	10,0
B 1–2–0	0,41	24,8
B 1–4–0	0,29	17,3
B 1–8–0	0,21	12,7
C 1–2–0	0,44	22,9
C 1–4–0	0,25	19,2
C 1–8–0	0,22	13,2
A 1–1,25–0,75	0,36	23,7
A 1–3,25–0,75	0,23	16,2
A 1–7,25–0,75	0,19	10,6
B 1–1,25–0,75	Rozpadly se	
B 1–3,25–0,75	0,34	18,9
B 1–7,25–0,75	0,20	13,6
C 1–1,25–0,75	0,38	26,5
C 1–3,25–0,75	0,30	19,2
C 1–7,25–0,75	0,27	15,8

U vzorků byla také sledována vlhkost, kterou obsahovaly v laboratorním prostředí. Tato se pohybovala od 0,19 hm. % až po 0,45 hm. %, vzorky tedy byly téměř suché. Nejvyšších vlhkostí dosahovaly vzorky s nejvyšším poměrem B/Ag, což koresponduje i s vyššími porozitami těchto vzorků. Vzorky B 1–1,25–0,75 se po uložení ve vodě rozpadly (viz obr. 51) a tedy u nich nebyla stanovena žádná z těchto vlastností. Nasákavosti jednotlivých vzorků byly následně porovnány v grafech na obr. 49 a 50.



Obr. 49 Nasákavosti vzorků malt bez jemně mletého vápence



Obr. 50 Nasákavosti vzorků malt s jemně mletým vápencem



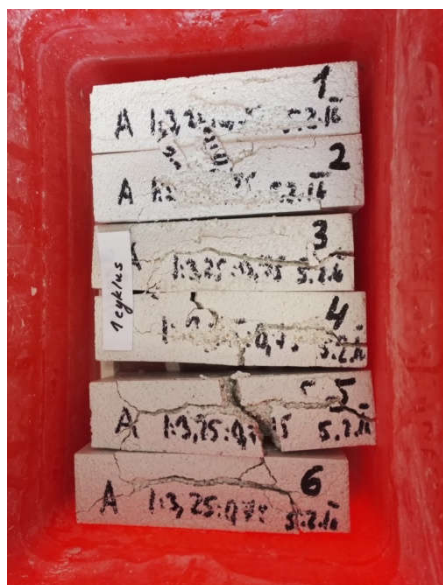
Obr. 51. Vzorky B 1–1,25–0,75 po 24 h ve vodě při zkoušce nasákavosti

V grafu na obr. 49 jsou porovnány nasákavosti jednotlivých vzorků bez přídavku jemně mletého vápence. Vidíme, že s rostoucím množstvím kameniva ve vzorku klesá jeho nasákavost. Nasákavosti korelují s celkovou porozitou vzorků, což můžeme pozorovat u všech vzorků, u kterých byla stanovována i porozita. Je zřejmé, že rtuť při rtuťové porozimetrii i voda při zkoušce nasákavosti vyplňují jedny a tytéž póry a tedy musí mezi těmito veličinami existovat jistá souvislost. Vzorky s kamenivem B a C měly větší nasákavost než vzorky s kamenivem A, což je způsobeno vyšší porozitou vzorků díky většímu množství záměsové vody v porovnání s maltami z kameniva křemenného (A).

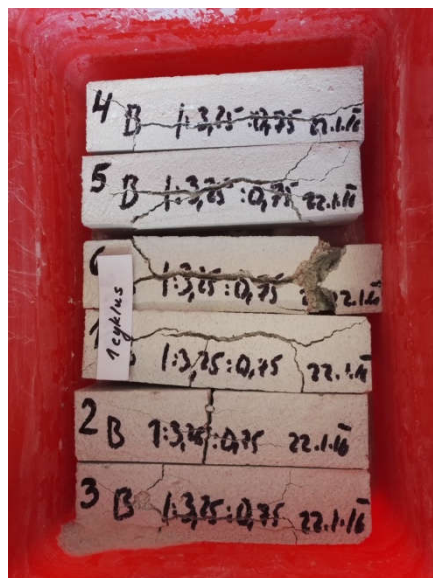
V grafu na obr. 50 jsou obdobně porovnány nasákavosti pro vzorky s přidaným jemně mletým vápencem. Můžeme zde, stejně jako u porozity, pozorovat mírné zvýšení nasákavosti vlivem přídavku jemně mletého vápence. Malty s kamenivem B a C mají vyšší nasákavost než vzorky s kamenivem A. Vzorky B 1–1,25–0,75 se po uložení ve vodě rozpadly, vzhledem k tomuto se dala očekávat jejich nízká mrazuvzdornost, stejně tak jako odolnost povětrnostním vlivům, která se potvrdila (viz kap. 4.2, obr. 29).

#### 4.6 Mrazuvzdornost dle ČSN 72 2452

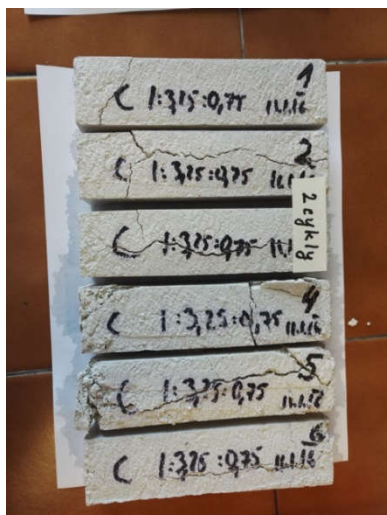
Vzorky byly po 28 dnech podrobeny zkoušce mrazuvzdornosti dle ČSN 72 2452. Tato zkouška není úplně vhodná pro vápenné malty, protože vyžaduje jejich nasycení vodou před provedením zkoušky. Těmto podmínkám však v reálné stavbě nejsou vápenné omítky a malty většinou vystaveny, a tak je tato zkouška pro ně příliš náročná.



Obr. 52 Vzorky A 1–3,25–0,75 po zkoušce mrazuvzdornosti



Obr. 53 Vzorky B 1–3,25–0,75 po zkoušce mrazuvzdornosti



Obr. 54 Vzorky C 1–3,25–0,75 po zkoušce mrazuvzdornosti

Tab. 13 Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti

vzorek	počet cyklů do rozpadu
A 1–2–0	2
A 1–4–0	2
A 1–8–0	3
B 1–2–0	1
B 1–4–0	2
B 1–8–0	2
C 1–2–0	1
C 1–4–0	2
C 1–8–0	3
A 1–1,25–0,75	1
A 1–3,25–0,75	1
A 1–7,25–0,75	2
B 1–1,25–0,75	0
B 1–3,25–0,75	1
B 1–7,25–0,75	1
C 1–1,25–0,75	1
C 1–3,25–0,75	2
C 1–7,25–0,75	3

Z výsledků v tabulce 12 je patrné, že většina vzorků se rozpadla již po jednom zmrazovacím cyklu, tedy po nasycení vodou a zmrazení. Vzorky B 1–1,25–0,75 se rozpadly již po nasycení vodou, obdobně jako při zkoušce nasákavosti. S rostoucím množstvím kameniva ve vzorku roste i počet cyklů, které vzorek vydržel. Toto je způsobeno nižší nasákavostí a porozitou, kdy vzorky nenasákly takové množství vody, aby způsobila fatální destrukci již po prvním

zmrazení. Přídavkem jemně mletého vápence, se odolnost vzorků mírně snižuje, toto je pravděpodobně způsobeno narůstající porozitou. Vzorky A 1–8–0 a vzorky C s poměrem B/Ag 1 : 8 absolvovaly bez porušení 3 zmrazovací cykly.

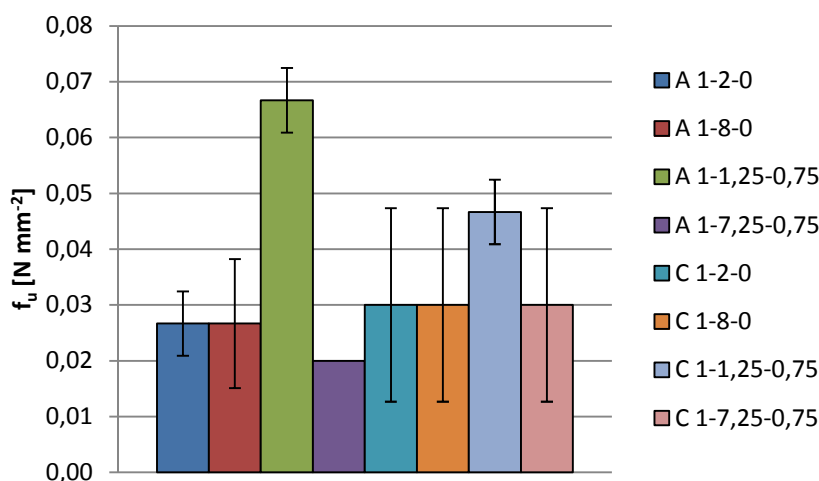
Bohužel po zkoušce již byly některé vzorky natolik porušeny, že u nich nebylo možné stanovit ani součinitel mrazuvzdornosti ani úbytek hmotnosti a lze tuto zkoušku posuzovat pouze podle počtu cyklů, které vzorky vydržely.

#### 4.7 Přídržnost zatvrdlé malty k podkladu dle ČSN EN 1015–12

Malty s kamenivý A a C s poměry B/Ag 1 : 2 a 1 : 8 byly nanесeny na cihly plné pálené, na kterých byly ponechány 28 dní, a následně bylo provedeno stanovení přídržnosti zatvrdlé malty k podkladu, u každé malty na třech zkušebních terčích.

Tab. 14 Výsledky přídržností malt k podkladu

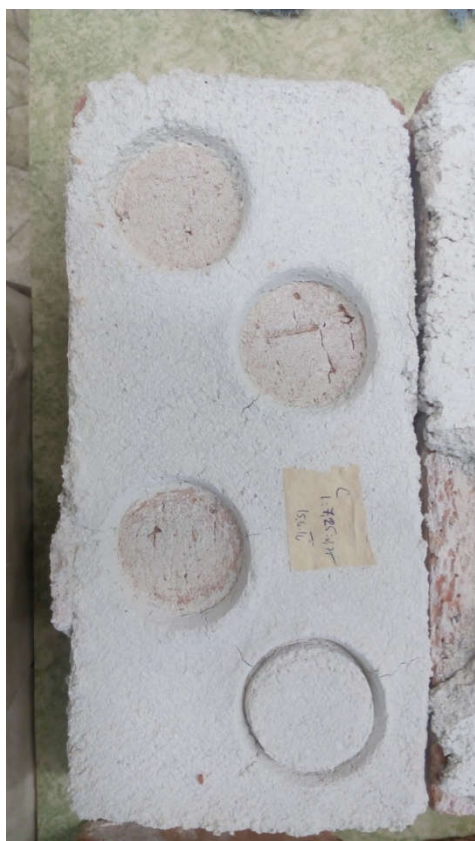
vzorek	$f_u$ [N mm <sup>-2</sup> ]
A 1–2–0	0,03
A 1–8–0	0,03
A 1–1,25–0,75	0,07
A 1–7,25–0,75	0,02
C 1–2–0	0,03
C 1–8–0	0,03
C 1–1,25–0,75	0,05
C 1–7,25–0,75	0,03



Obr. 55 Porovnání přídržností k podkladu jednotlivých vzorků malt

Z tabulky 14 a grafu na obr. 55 pozorujeme, že na přídržnost k podkladu malty nemá vliv poměr B/Ag ani druh použitého kameniva, kdy vápencové kamenivo sice vykazuje mírně vyšší hodnoty přídržnosti, avšak s větší směrodatnou odchylkou výběru. Přídavek jemně mletého vápence, zdá se, má pozitivní vliv pouze při poměru

B/Ag 1 : 2, kdy vzorky s křemenným i vápencovým kamenivem dosahují výrazně vyšších hodnot než vzorky ostatní. Je tedy zřejmé, že přídržnost je závislá především na pojivu, které je u všech vzorků totožné a ani jeho rozdílné množství nemá větší vliv na hodnoty přídržnosti. Na obr. 56 a 57 jsou zobrazeny cihly s nanesenou vrstvou malty po provedení zkoušky. Z fotografií je zřejmé, že se jednalo z velké části o lom adhezní, tedy porušení na rozhraní podkladu a malty a tedy hodnoty stanovené touto zkouškou jsou přímo hodnoty napětí potřebného pro oddělení malty od podkladu.



Obr. 56 Zkouška přídržnosti malty  
C 1–7,25–0,75



Obr. 57 Zkouška přídržnosti malty  
A 1–1,25–0,75

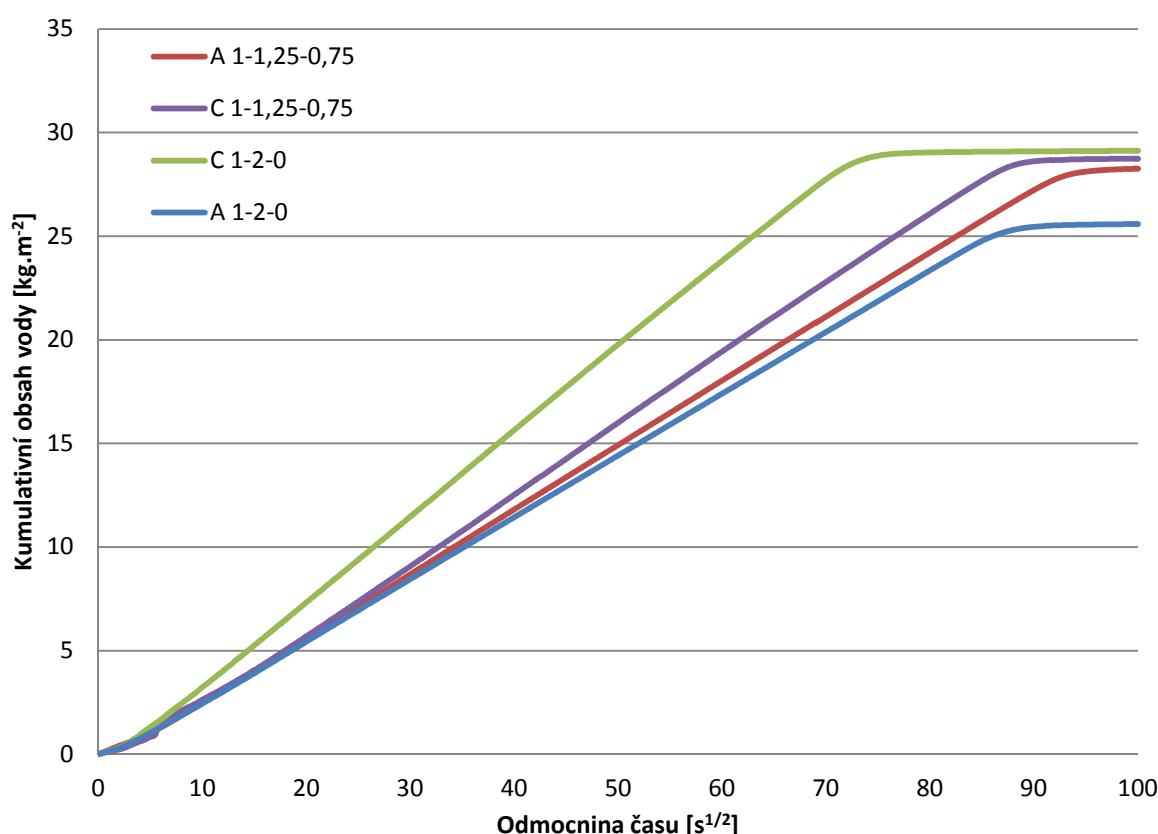
#### 4.8 Kapilární vztlínatost dle ČSN EN 1015–18

Na vzorcích malt s kamenivem A a C s poměrem B/Ag 1 : 2 byla po 28 dnech provedena zkouška kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě. Výsledkem je graf závislosti kumulativního obsahu vody ve vzorku v závislosti na čase na obr. 58 a také hodnoty koeficientu absorpce vody A a průměrné hodnoty součinitele vlhkostní vodivosti  $k$  uvedené v tabulce 15.



Tab. 15 Hodnoty  $A$  a  $\kappa$  pro sledované malty

vzorek	w	l	t	A	$\kappa$
	[kg·m <sup>-3</sup> ]	určeno z grafu [kg·m <sup>-2</sup> ]	určeno z grafu [s <sup>-0.5</sup> ]	[kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-0.5</sup> ]	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
A 1–2–0	319,91	20,38	70	0,2912	$8,3 \times 10^{-7}$
A 1–1,2–0,75	353,25	21,12	70	0,3017	$7,3 \times 10^{-7}$
C 1–2–0	394,48	23,81	60	0,3969	$10,1 \times 10^{-7}$
C 1–1,25–0,75	388,69	19,44	60	0,3239	$7,0 \times 10^{-7}$



Obr. 58 Závislost kumulativního obsahu vody ve vzorcích na čase

V grafu na obr. 58 pozorujeme větší rychlost nasáknutí vody do vzorků malty s vápenným kamenivem C, kdy vzorek bez přídavku jemně mletého vápence vykazuje nejrychlejší nárůst kumulativního obsahu vody a dosáhne tedy i nejvyšší hodnoty vlhkostního hmotnostního koeficientu  $A$  a průměrné hodnoty součinitele vlhkostní vodivosti  $\kappa$ . Přídavkem jemně mletého vápence do této malty dojde ke snížení těchto hodnot. Křivky vzorků malt s křemenným kamenivem mají velmi podobný průběh. Mírně strmější lineární část křivky, a tedy i větší hodnoty  $A$  a  $\kappa$  dosáhla malta s přídavkem jemně mletého vápence.

Výsledky kapilární vztlácnosti korelují s výsledky celkové porozity vzorků, kdy vzorky C 1–2–0 měly porozitu nejvyšší (40,0 %) následované vzorky

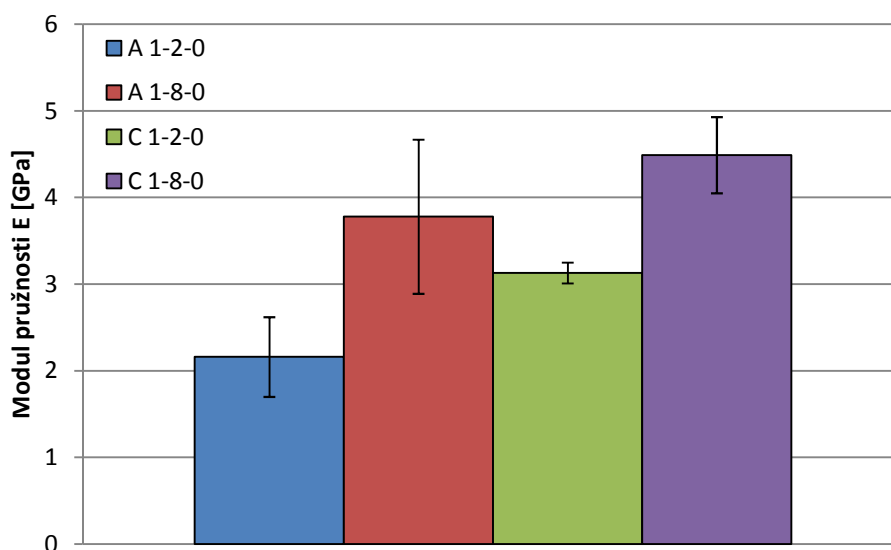
C 1–1,25–0,75 (37,0 %) a vzorky s křemenným kamenivem s a bez přidaného jemně mletého vápence (36,6 % resp. 33,5 %).

## 4.9 Lomově mechanické parametry

Na sadách vzorků A a C s poměrem B/Ag 1 : 2 a 1 : 8 byly po 28 dnech zrání stanoveny lomově mechanické parametry. Toto stanovení spočívá v zatěžování vzorku opatřeného zářezem do jedné třetiny výšky tělesa, aby bylo zajištěno přesné místo porušení, tříbodovým ohybem obdobně jako u zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. U vzorku se při zatěžování sleduje průhyb v závislosti na zatěžovací síle. Zatěžování vzorků probíhá spojitě za konstantního přírůstku posunu/průhybu uprostřed rozpětí. Z tohoto měření je vytvořen tzv. I–d diagram, jež je vyhodnocen metodou efektivního prodloužení trhliny, která umožňuje v dané úpravě získat vedle odhadu modulu pružnosti vzorku ( $E$ ) také řadu veličin, které kvantifikují různým způsobem odolnost proti šíření trhliny, např. efektivní lomovou houževnatost  $K_{ice}$  a lomovou energii  $G_f$ . Výsledky z tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 16 a porovnány v grafech na obr. 59 – 61

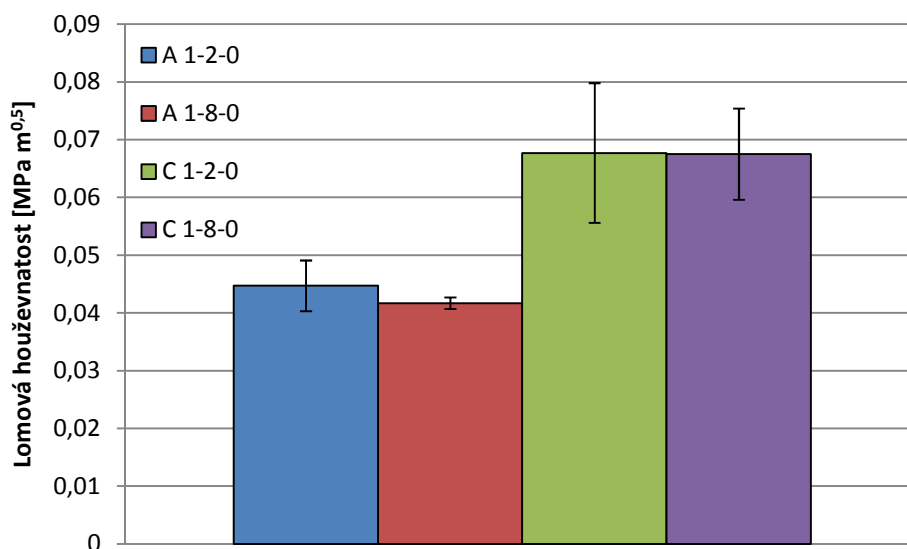
Tab. 16 Výsledné hodnoty ze zkoušek lomových parametrů

vzorek	E	$K_{ice}$	$G_f$
	[GPa]	[MPa m <sup>0,5</sup> ]	[J m <sup>-2</sup> ]
A 1–2–0	2,16	0,0447	3,915
A 1–8–0	3,78	0,0417	2,638
C 1–2–0	3,13	0,0677	5,138
C 1–8–0	4,49	0,0675	6,188

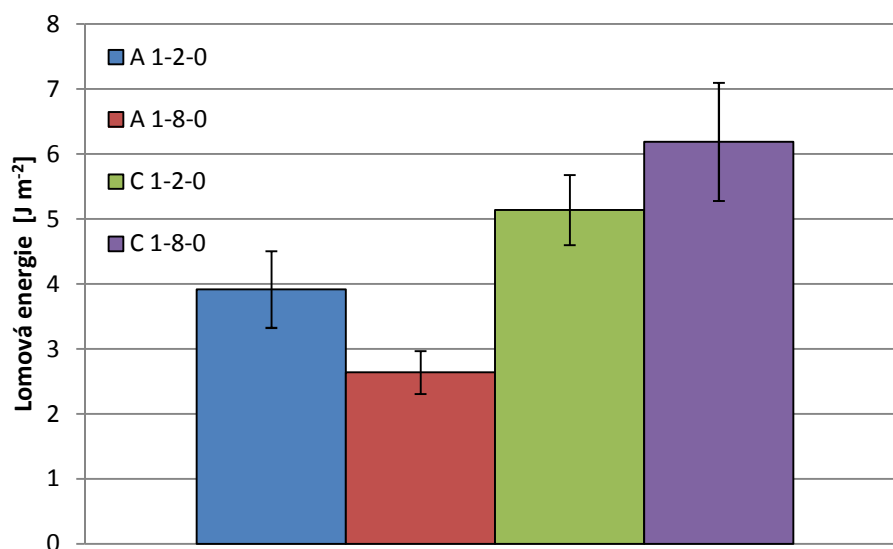


Obr. 59 Porovnání modulu pružnosti jednotlivých vzorků





Obr. 60 Porovnání lomové houževnatosti jednotlivých vzorků



Obr. 61 Porovnání lomové energie jednotlivých vzorků

Z grafu na obr. 59 pozorujeme vliv druhu a množství kameniva na modul pružnosti vápenné malty. Vzorky s vápencovým kamenivem dosáhly vyšších hodnot než vzorky s kamenivem křemenným při stejném poměru B/Ag. S rostoucím množstvím kameniva ve vzorku roste hodnota modulu pružnosti, tedy vzorky s větším množstvím kameniva vykazovaly při stejném zatížení menší deformaci než vzorky s menším objemem kameniva.

Na obr. 60 je graf porovnávající lomovou houževnatost vzorků  $K_{Ic}$ , tedy odolnost vzorku proti šíření trhliny, nebo i proti porušení za přítomnosti trhliny a zohledňuje křehkost vzorku skrze rozsah nelinearity I-d diagramu před dosažením vrcholu zatížení. Získané hodnoty jsou pro všechny typy vápenných malt dosti nízké – jedná se o velmi křehké materiály. Pozorujeme, že vápencové

kamenivo má pozitivní vliv na lomovou houževnatost. Toto bude pravděpodobně důsledkem tvaru zrn vápencového kameniva v porovnání s kamenivem křemenným. Poměr B/Ag nemá na lomovou houževnatost téměř žádný vliv. Při větším množství plniva byly vzorky pouze méně houževnatější než s výrazně nižším obsahem pojiva.

V grafu na obr. 61 jsou porovnány lomové energie jednotlivých vzorků. Lomová energie kvantifikuje křehkost vzorků také se zahrnutím sestupné větve I-d diagramu. V tomto smyslu se jevila jako relativně nejhouževnatější malta s vápencovým kamenivem a vyšším obsahem kameniva. Vliv poměru B/Ag je zde těžko pozorovatelný, protože u kameniva A má opačný vliv než u kameniva C.

Z výsledků lomově mechanických zkoušek můžeme konstatovat, že vápencové kamenivo z lomu Štramberk má pozitivní vliv na lomově mechanické vlastnosti vápenných malt a přispívá k jejich lepším hodnotám na rozdíl od křemenného kameniva.

## 5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo v teoretické části provést rešerši v oboru vápenných malt především s ohledem na vliv použitého kameniva a jeho množství na výsledné vlastnosti vápenných malt. V praktické části práce byly porovnány vlastnosti malt s křemenným a vápencovým kamenivem a s různým poměrem B/Ag a následně i s přidavkem jemně mletého vápence. Tyto vlastnosti byly sledovány po dobu až 365 dní a závěrem konfrontovány s poznatky z teoretické části práce.

Velmi dobře pozorovatelný je vliv poměru B/Ag na vlastnosti výsledné malty, kdy s rostoucím poměrem pojiva rostou také fyzikálně mechanické vlastnosti malt, jak uvádí J. Lanas [7]. Malta s poměrem B/Ag 1 : 2 dosahovala přibližně o 25 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu v porovnání s maltou 1 : 4 a obdobně malta 1 : 8 dosahovala 77 % pevnosti malty 1 : 4 po 365 dnech uložení v laboratoři. Obdobné poměry mezi pevnostmi jednotlivých malt byly sledovány i u pevnosti v tlaku. S rostoucím množstvím pojiva roste ovšem také celková porozita výsledné malty (průměrně 36,3 % u B/Ag 1 : 2 oproti 26,4 % u B/Ag 1 : 8), se kterou roste také nasákavost a kapilární vztlínatost malt. Zvýšená porozita má negativní vliv na mrazuvzdornost výsledné malty. Ani po 365 dnech neproběhla u většiny vzorků s velkým objemem pojiva karbonatace úplně a tedy ani vlastnosti těchto malt ještě nejsou konečné. S velkým množstvím pojiva je také spojeno velké množství jemných částic v maltě, což má za následek vyšší smrštění a smršťovací trhliny, jejichž vývoj a výskyt nebyl přesně sledován, avšak je zřejmý například při porovnání vzorků pro zkoušku přídržnosti na obr. 56 a 57. Na přídržnost zatvrdlé malty k podkladu neměl poměr B/Ag téměř žádný vliv. S rostoucím množstvím plniva roste i modul pružnosti výsledné malty. Naopak lomová houževnatost se nepatrně snížila. Výsledky výpočtu lomové energie nejsou jednoznačné, kdy u jednoho druhu kameniva nastává opačný efekt než u kameniva druhého. Je tedy při volbě poměru B/Ag zvážit nejenom požadavek na pevnostní charakteristiky, ale také, a to především, počítat se smršťováním malty při jejím vysychání a zvolit vhodný kompromis.

Výsledky použití různého druhu kameniva odpovídají předpokladům z kapitoly 2.4. Při použití vápencového kameniva nejsou pozorovatelné tak velké rozdíly v pevnostech jako ve výzkumu J. Lanase. [7] Tento rozdíl však může být způsoben druhem použitého kameniva, kdy každé vápencové kamenivo bude působit rozdílně. Při porovnání výsledků malt z kameniva křemenného (A) a vápencového (C) můžeme konstatovat, že malty C dosáhly téměř stejných pevností jako malty A, ve většině případů se hodnoty pevnosti pohybují v rozmezí  $\pm 10$  % od hodnot pevností malt s kamenivem křemenným. Musíme vzít v potaz také to, že pro malty z vápencového kameniva bylo použito více záměsové vody, a lze tedy předpokládat, že při dodržení stejného vodního součinitele jako u malt A, by dosáhly lepších výsledků. Malta ze směsného kameniva (B) dosahuje při poměru B/Ag 1 : 4 mírně lepších výsledků než malty A a C, avšak při poměru 1 : 8

má vlastnosti srovnatelné s oběma maltami a pro poměr 1 : 2 se kamenivo B jeví jako nevhodné, protože jeho pevnosti odpovídají pevnostem ostatních malt při poměru 1 : 8 a také při uložení ve venkovním prostředí se tyto vzorky rozpadly. Vyšší množství záměsové vody má vliv i na mírně vyšší porozitu malt z vápencového kameniva. Toto však nemá vliv na mrazuvzdornost malty, která je v obou případech srovnatelná. Malty z vápencového kameniva dosáhly dříve většího stupně karbonatace a můžeme tedy předpokládat pozitivní vliv obsahu vápence v kamenivu na vlastnosti výsledných malt. Druh použitého kameniva nemá vliv na přídržnost zatvrdlé malty k podkladu. Všechny lomové mechanické parametry jsou vyšší při použití vápencového kameniva a je zde zjevný jeho pozitivní vliv.

Přídavkem jemně mletého vápence do malt dosáhneme zlepšení pevností v tahu za ohybu po 365 dnech zrání v laboratoři o 15 % (B 1 : 4) až 51 % (C 1 : 4). Pevnosti v tlaku vzrůstaly přibližně stejně jako pevnosti v tahu za ohybu. Při přípravě malty s křemenným kamenivem jsme mohli pozorovat pozitivní vliv přídavku jemně mletého vápence na zpracovatelnost čerstvé malty, především z důvodu doplnění kameniva o jemnou frakci, kterou postrádalo. Tento efekt byl pozorovatelný i u kameniva B, zatímco u kameniva C se neprojevil téměř vůbec, protože toto kamenivo bylo širší frakce. Vzorky s přídavkem jemně mletého vápence obsahovaly ve sledovaných časech méně  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v porovnání s maltami bez přídavku. Je zde tedy pozorován podobný vliv jako v případě vápencového kameniva. Přídavkem jemně mletého vápence do malt docílíme vyšší porozity dané malty, čímž zvýšíme i její nasákavost. Nárůstem porozity je dáno i mírné snížení mrazuvzdornosti vzorků. Přídavkem jemně mletého vápence nahradíme v maltách část hrubého kameniva velmi jemnými částicemi, což může mít za následek vyšší smrštění vzorků, především u poměru B/Ag 1 : 2. Přídavek jemně mletého vápence do malt s poměrem B/Ag 1 : 2 měl za následek zvýšení přídržnosti zatvrdlé malty k podkladu, tento vliv nebyl u poměru 1 : 8 pozorován.

Výsledky získané z experimentální části diplomové práce odpovídají předpokladům z literární rešerše. Z výsledků vyplývá, že použité vápencové kamenivo frakce 0–2,5 mm z vápencového lomu Štramberk lze s výhodou využít ve vápenných maltách. Nejvhodnější aplikace malt s tímto kamenivem se jeví takové, kde je kladen důraz na vyšší pórovitost malt (rychlejší vysychání, snazší odvod par) se zachováním dostatečných pevnostních vlastností.

## 6. Seznamy

### 6.1 Seznam použité literatury

[1] VITRUVIUS POLLIO, Marcus. *Deset knih o architektuře*. 3. vyd. Praha: Arista, 2001, 438 s. ISBN 80-864-1023-4.

[2] PAVÍA, S. a B. TOOMEY. Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly-hydraulic lime mortars. *Materials and Structures* [online]. 2008, **41**(3), 559-569 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1617/s11527-007-9267-4. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-007-9267-4>.

[3] POLAT, Rýza, et al. The corellation between aggregate shape and compresive strenght of concrete: digital image processing approach. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. 2013, vol. 2, č. 3, s. 62-80.

[4] STEFANIDOU, M. a I. PAPAYIANNI. The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2005, **27**(9-10), 914-919 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2005.05.001. ISSN 09589465. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946505000570>

[5] CHROUST, František, KVASNIČKA, I. a KVASNIČKOVÁ, R. *Omítky*. 2. upr. vyd. Praha: SNTL, 1959, 189 s. Odborné příručky pro stavebnictví

[6] WINNEFELD, Frank a Karl Georg BÖTTGER. How clayey fines in aggregates influence the properties of lime mortars. *Materials and Structures* [online]. 2007-8-15, **39**(4), 433-443 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1617/s11527-005-9023-6. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-005-9023-6>

[7] LANAS, J a José I ALVAREZ-GALINDO. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research* [online]. 2003, **33**(11), 1867-1876 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00210-2. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884603002102>

[8] CAZALLA, Olga, Carlos RODRIGUEZ-NAVARRO, Eduardo SEBASTIAN, Giuseppe CULTRONE a Maria Jose TORRE. Aging of Lime Putty: Effects on Traditional Lime Mortar Carbonation. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 2000, **83**(5), 1070-1076 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01332.x. ISSN 00027820. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01332.x>

- [9] MOROPOULOU, A., A.S. CAKMAK, G. BISCONTIN, A. BAKOLAS a E. ZENDRI. Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Construction and Building Materials* [online]. 2002, **16**(8), 543-552 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00005-3. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061802000053>
- [10] POZO-ANTONIO, J.S. Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **77**, 472-478 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815000033>
- [11] CASADIO, F., G. CHIARI a S. SIMON. Evaluation of binder/aggregate ratios in archaeological lime mortars with carbonate aggregate: A comparative assesment od chemical, mechanical and microscopic approaches\*. *Archaeometry* [online]. 2005, **47**(4), 671-689 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1111/j.1475-4754.2005.00226.x. ISSN 0003-813x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1475-4754.2005.00226.x>
- [12] LOSOS, Ludvík a GAVENDA, M. *Štukatérství*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 181 s. Řemesla, tradice, technika. ISBN 978-80-247-2175-0
- [13] BAYER, R., LUTZ., H: Dry Mortars. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* [online]. 6. ed. 2003, Electronic Release, Wiley-VCH, Weinheim. 17 s
- [14] LANAS, J., J.L. PÉREZ BERNAL, M.A. BELLO a J.I. ALVAREZ. Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research* [online]. 2006, **36**(5), 951-960 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.10.004. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884605002371>
- [15] LANAS, J., J.L. PÉREZ BERNAL, M.A. BELLO a J.I. ALVAREZ GALINDO. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research* [online]. 2004, **34**(12), 2191-2201 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.02.005. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604000808>
- [16] STOKLASA Z. Závěrečná zpráva
- [17] POITEVIN, P. Limestone aggregate concrete, usefulness and durability. *Cement and Concrete Composites* [online]. 1999, **21**(2), 89-97 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/S0958-9465(98)00047-X. ISSN 09589465. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095894659800047X>

- [18] ŽIŽLAVSKÝ T. *Omítky s přidavkem jemně mletého vápence*. Brno, 2015. 44 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.
- [19] MATOUŠEK, Milan a Rostislav DROCHYTKA. *Atmosférická korozie betonů*. Praha: Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1998. ISBN 80-902558-0-9.
- [20] CHROMÁ, M. *Studium a modelování karbonatizace betonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 143 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
- [21] SHIH, Shin-Min, et al. Kinetics of the Reaction of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  with  $\text{CO}_2$  at Low Temperature. *Industrial*. 1999. **38**(4): 1316-1322. DOI: 10.1021/ie980508z. ISSN 0888-5885. Dostupné také z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie980508z>
- [22] LANAS, J., R. SIRERA a J.I. ALVAREZ. Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions. *Cement and Concrete Research* [online]. 2006, **36**(5), 961-970 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.12.003. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888460500311X>
- [23] ALLALI, F., E. JOUSSEIN, N. Idrissi KANDRI a S. ROSSIGNOL. The influence of calcium content on the performance of metakaolin-based geomaterials applied in mortars restoration. *Materials & Design* [online]. 2016, **103**, 1-9 [cit. 2016-11-08]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.028. ISSN 02641275. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516304956>
- [24] ČSN EN 1097–3 *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypané hmotnosti mezerovitosti volně sypaného kameniva*, Praha: ČNI, 1999
- [25] ČSN EN 1015–3 *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*, Praha: ČNI, 2000
- [26] ČSN EN 1015–11 *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*, Praha: ČNI, 2000
- [27] ČSN EN 13755 *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku*, Praha: ČNI, 2008
- [28] ČSN 72 2452 *Zkouška mrazuvzdornosti malty*, Praha: ČNI, 1968
- [29] ČSN EN 1015–12 *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 12: Stanovení přidrženosti zatvrdlých malt pro vnitřní a vnější omítky k podkladu*, Praha: ČNI, 2000

[30] ČSN EN 1015–18 *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě*, Praha: ČNI, 2003

## 6.2 Seznam symbolů a zkratk

A	křemenné kamenivo
A	koeficient absorpce vody
B	směsné kamenivo 50 % vápencového a 50 % křemenného kameniva
B/Ag	poměr Binder/Aggregate tedy pojiva ke kamenivu
C	vápencové kamenivo
Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxid vápenatý, portlandit
CaCO <sub>3</sub>	uhličitan vápenatý, kalcit
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
DTA	diferenčně termická analýza
E	vzorky uložené v exteriéru
<i>E</i>	modul pružnosti
EDTA	kyselina ethylendiamintetraoctová
<i>G<sub>f</sub></i>	lomová energie
<i>K<sub>Ice</sub></i>	lomová houževnatost
<i>κ</i>	součinitel vlhkostní vodivosti
rh	relativní vlhkost vzduchu
SiO <sub>2</sub>	oxid křemičitý
TG	termogravimetrie
XRD	Rentgenová difrakční analýza
Z. Ž.	ztráta žíháním



### 6.3 Seznam obrázků

Obr. 1 Vliv frakce kameniva na pevnost (S) a porozitu (P) malty s B/Ag 1 : 1,5 ....	12
Obr. 2 Vliv poměru B/Ag na smrštění vápenné malty .....	14
Obr. 3 Vliv frakce kameniva na smrštění vápenné malty .....	14
Obr. 4 Vliv poměru B/Ag na pevnost v tlaku a porozitu vápenné malty .....	15
Obr. 5 Pevnosti v tlaku na vzorcích vzdušného vápna, ag–2 křemenné kamenivo ag–3 kamenivo vápencové .....	18
Obr. 6 Pevnosti v tlaku na vzorcích dolomitického vápna, ag–2 křemenné kamenivo ag–3 kamenivo vápencové .....	18
Obr. 7 Pevnosti v tlaku na vzorcích hydraulického vápna, ag–2 křemenné kamenivo ag–3 kamenivo vápencové .....	19
Obr. 8 Obecná závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu .....	21
Obr. 9 Granulometrie kameniv .....	23
Obr. 10 Difraktogram vápence Štramberk .....	24
Obr. 11 Křemenný písek .....	25
Obr. 12 Vápencové kamenivo .....	25
Obr. 13 Vodní součinitele připravených malt .....	26
Obr. 14 Vývoj objemových hmotností vzorků A .....	29
Obr. 15 Vývoj objemových hmotností vzorků B .....	30
Obr. 16 Vývoj objemových hmotností vzorků C .....	30
Obr. 17 Porovnání objemových hmotností vzorků A po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	30
Obr. 18 Porovnání objemových hmotností vzorků B po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	31
Obr. 19 Porovnání objemových hmotností vzorků C po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	31
Obr. 20 Vývoj objemových hmotností vzorků s poměrem B/Ag 1 : 4 .....	31
Obr. 21 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků A .....	33
Obr. 22 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků B .....	33

Obr. 23 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků C .....	33
Obr. 24 Porovnání pevností v tahu za ohybu vzorků A po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	34
Obr. 25 Porovnání pevností v tahu za ohybu vzorků B po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	34
Obr. 26 Porovnání pevností v tahu za ohybu vzorků C po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	34
Obr. 27 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků s poměrem B/Ag 1 : 4 .....	35
Obr. 28 Vzorky B 1–2–0 E .....	36
Obr. 29 Vzorky B 1–1,25–0,75 E .....	36
Obr. 30 Vývoj pevností v tlaku vzorků A .....	37
Obr. 31 Vývoj pevností v tlaku vzorků B .....	38
Obr. 32 Vývoj pevností v tlaku vzorků C .....	38
Obr. 33 Porovnání pevností v tlaku vzorků A po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	38
Obr. 34 Porovnání pevností v tlaku vzorků B po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	39
Obr. 35 Porovnání pevností v tlaku vzorků C po 365 dnech v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	39
Obr. 36 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků s poměrem B/Ag 1 : 4 .....	39
Obr. 37 Porovnání křivek kumulativního objemu pórů vzorků A a C poměrů 1:2:0 a 1:8:0 po 28 a 180 dnech zrání .....	40
Obr. 38 Porovnání křivek kumulativního objemu pórů vzorků A a C poměrů 1:1,25:0,75 a 1:7,25:0,75 po 28 a 180 dnech zrání .....	41
Obr. 39 Porovnání křivek kumulativního objemu pórů vzorků A a C poměrů 1:2:0 a 1:8:0 po 365 dnech zrání v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	41
Obr. 40 Porovnání křivek kumulativního objemu pórů vzorků A a C poměrů 1:2,25:0,75 a 1:7,25:0,75 po 365 dnech zrání v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	41
Obr. 41 Porovnání celkové porozity vzorků malt po 28 a 180 dnech zrání .....	42
Obr. 42 Porovnání celkové porozity vzorků malt po 365 dnech zrání v laboratoři (-) a v exteriéru (E) .....	42

Obr. 43 Fenolftaleinový test vzorku A 1–1,25–0,75 po 90 dnech zrání .....	43
Obr. 44 Grafické porovnání hloubky karbonatace malt .....	44
Obr. 45 Grafické porovnání hloubky karbonatace ve vzorcích s jemně mletým vápencem.....	45
Obr. 46 Termoanalytické křivky vzorku A 1–4–0 po 365 dnech zrání.....	46
Obr. 47 Porovnání obsahu $\text{Ca(OH)}_2$ ve vzorcích malt v závislosti na době zrání .	47
Obr. 48 Porovnání obsahu $\text{Ca(OH)}_2$ ve vzorcích malt s jemně mletým vápencem v závislosti na době zrání .....	48
Obr. 49 Nasákavosti vzorků malt bez jemně mletého vápence .....	50
Obr. 50 Nasákavosti vzorků malt s jemně mletým vápencem .....	50
Obr. 51. Vzorky B 1–1,25–0,75 po 24 h ve vodě při zkoušce nasákavosti .....	50
Obr. 52 Vzorky A 1–3,25–0,75 po zkoušce mrazuvzdornosti .....	51
Obr. 53 Vzorky B 1–3,25–0,75 po zkoušce mrazuvzdornosti .....	51
Obr. 54 Vzorky C 1–3,25–0,75 po zkoušce mrazuvzdornosti.....	52
Obr. 55 Porovnání přídržností k podkladu jednotlivých vzorků malt .....	53
Obr. 56 Zkouška přídržnosti malty C 1–7,25–0,75 .....	54
Obr. 57 Zkouška přídržnosti malty A 1–1,25–0,75 .....	54
Obr. 58 Závislost kumulativního obsahu vody ve vzorcích na čase .....	55
Obr. 59 Porovnání modulu pružnosti jednotlivých vzorků.....	56
Obr. 60 Porovnání lomové houževnatosti jednotlivých vzorků .....	57
Obr. 61 Porovnání lomové energie jednotlivých vzorků .....	57

## 6.4 Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení kameniv [hm. %].....	22
Tab. 2 Chemické složení kameniv [hm. %] pokračování .....	22
Tab. 3 Chemické složení kameniv [%] .....	24
Tab. 4 Sypné hmotnosti .....	25
Tab. 5 Receptury malt .....	27
Tab. 6 Objemové hmotnosti vzorků malt .....	29
Tab. 7 Pevnosti v tahu za ohybu .....	32
Tab. 8 Pevnosti v tlaku .....	37
Tab. 9 Hloubka karbonatace malt stanovená fenolftaleinovým testem.....	44
Tab. 10 Množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a $\text{CaCO}_3$ ve vzorcích po 28, 90 a 180 dnech zrání ....	46
Tab. 11 Množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a $\text{CaCO}_3$ ve vzorcích po 28, 90 a 180 dnech zrání ....	47
Tab. 12 Hodnoty přirozené vlhkosti a nasákavosti vzorků malt. ....	49
Tab. 13 Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti.....	52
Tab. 14 Výsledky přídržností malt k podkladu .....	53
Tab. 15 Hodnoty $A$ a $\kappa$ pro sledované malty.....	55
Tab. 16 Výsledné hodnoty ze zkoušek lomových parametrů .....	56

## 6.5 Seznam příloh

Příloha 1 Difraktogram jemně mletého vápence 2 VA

Příloha 2 Difraktogram směsi křemenných kameniv PG I + PG II + PG III

Příloha 3 Vývoj objemových hmotností vzorků s poměrem B/Ag 1 : 8

Příloha 4 Vývoj objemových hmotností vzorků s poměrem B/Ag 1 : 2

Příloha 5 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků s poměrem B/Ag 1 : 8

Příloha 6 Vývoj pevností v tahu za ohybu vzorků s poměrem B/Ag 1 : 2

Příloha 7 Vývoj pevností v tlaku vzorků s poměrem B/Ag 1 : 8

Příloha 8 Vývoj pevností v tlaku vzorků s poměrem B/Ag 1 : 2

Příloha 9 Karbonatace A 1–2–0 28 d

Příloha 10 Karbonatace A 1–4–0 28 d

Příloha 11 Karbonatace A 1–8–0 28 d

Příloha 12 Karbonatace A 1–1,25–0,75 28 d

Příloha 13 Karbonatace A 1–3,25–0,75 28 d

Příloha 14 Karbonatace A 1–7,25–0,75 28 d

Příloha 15 Karbonatace C 1–2–0 28 d

Příloha 16 Karbonatace C 1–4–0 28 d

Příloha 17 Karbonatace C 1–8–0 28 d

Příloha 18 Karbonatace C 1–1,25–0,75 28 d

Příloha 19 Karbonatace C 1–3,25–0,75 28 d

Příloha 20 Karbonatace C 1–7,25–0,75 28 d

Příloha 21 Karbonatace A 1–2–0 365 d

Příloha 22 Karbonatace A 1–4–0 365 d

Příloha 23 Karbonatace A 1–8–0 365 d

Příloha 24 Karbonatace A 1–1,25–0,75 365 d

Příloha 25 Karbonatace A 1–3,25–0,75 365 d

Příloha 26 Karbonatace A 1–7,25–0,75 365 d

Příloha 27 Karbonatace C 1–2–0 365 d

Příloha 28 Karbonatace C 1–4–0 365 d

Příloha 29 Karbonatace C 1–8–0 365 d

Příloha 30 Karbonatace C 1–1,25–0,75 365 d

Příloha 31 Karbonatace C 1–3,25–0,75 365 d

Příloha 32 Karbonatace C 1–7,25–0,75 365 d

Příloha 33 The Effect of Aggregate Type on the Properties of Lime Mortars